

ADELINO ANDERSON GODOI

**ALOCÇÃO DE BANCOS DE
CAPACITORES EM REDES PRIMÁRIA E
SECUNDÁRIA DE ENERGIA ELÉTRICA**

Curitiba

2009

ADELINO ANDERSON GODOI

ALOCAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES EM REDES PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA DE ENERGIA ELÉTRICA

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki

Co-orientador: Prof.^a Dr.^a Thelma Solange
Piazza Fernandes

Curitiba

2009

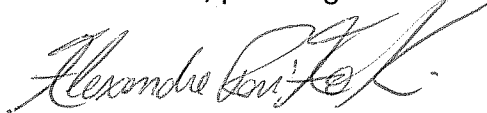
TERMO DE APROVAÇÃO

ADELINO ANDERSON GODOI

ALOCÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES EM REDES PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA DE ENERGIA ELÉTRICA

Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:

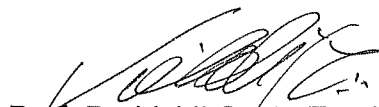


Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Co-orientadora:



Profa. Dra. Thelma S. Piazza Fernandes
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR



Prof. Dr. Voldi Costa Zambenedetti
Departamento de Eletroeletrônica, LACTEC



Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica, UNICAMP

Curitiba, 26 de fevereiro de 2009.

DEDICATÓRIA

DEDICO ESTE TRABALHO A MINHA FILHA, JÚLIA CARON GODOI QUE SEMPRE
SERÁ, A ALEGRIA DE MEUS DIAS.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus acima de tudo, pois foi através de sua benção e ensinamentos que pude superar os momentos difíceis...

Ao amigo e Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki pelo apoio, conselhos e orientações, mas principalmente, pela oportunidade de me tornar uma pessoa melhor.

À Prof.^a Dr.^a Thelma S. Piazza Fernandes que contribuiu como co-orientadora através do seu conhecimento com excelentes observações para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Voldi Costa Zambenedetti pelas sugestões e contribuições feitas em relação a este trabalho durante a qualificação e defesa.

Ao Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva pela complementação dada a esta dissertação na ocasião da defesa.

Ao amigo Eng. M.Sc. Itamar Szuvovivski que as experiência compartilhadas no percurso até aqui sejam a alavanca para alcançarmos a alegria de chegar ao destino por cada um de nós projetado.

Ao amigo Eng. M.Sc. Flávio Resende Garcia meus sinceros agradecimentos por sua hospitalidade, disponibilidade, apoio e principalmente por acreditar em uma nova jornada juntos.

À minha família, mãe e irmãos, pelo apoio, incentivo e compreensão dos momentos ausentes...

À minha esposa, Alexandra Maria Caron Godoi pela dedicação, carinho, compreensão e principalmente em acreditar mim.

Ao Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento (LACTEC) pelo apoio financeiro e pela infra-estrutura concedida para a realização deste trabalho.

E a todos os outros que não foram mencionados aqui, mas que de alguma maneira contribuíram e fizeram parte desta caminhada.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	INTRODUÇÃO	22
1.2	OBJETIVOS	23
1.3	ESTADO DA ARTE	23
1.4	FLUXO DE POTÊNCIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO	27
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	28
2	CAPACITORES DE POTÊNCIA	29
2.1	INTRODUÇÃO	29
2.2	CONCEITO DE CONSTRUÇÃO BÁSICO DE CAPACITORES	29
2.3	PRINCIPAIS TIPOS DE CAPACITORES	31
2.3.1	Capacitores PPM (Polipropileno Metalizado)	31
2.3.2	Capacitores NÃO-PPM	33
2.3.3	Comparativo Técnico entre Capacitores do Tipo PPM e NÃO-PPM	34
2.4	TIPOS DE BANCOS DE CAPACITORES	36
2.4.1	Bancos de Capacitores com Fusível Externo	36
2.4.2	Bancos de Capacitores com Fusível Interno	37
2.4.3	Bancos de Capacitores sem Fusível (<i>Fuseless</i>)	38
2.4.4	Comparação entre os Tipos de Capacitores	38
2.5	ESPECIFICAÇÕES PARA APLICAÇÕES DE BANCOS DE CAPACITORES EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO	39
2.5.1	Características dos Capacitores da Rede Primária	40
2.5.2	Características dos Capacitores da Rede Secundária	41
2.6	CONFIGURAÇÃO DA MONTAGEM	43
2.7	CUIDADOS QUE ENVOLVEM A APLICAÇÃO DOS BANCOS DE CAPACITORES	45
2.7.1	Efeitos dos Capacitores em Circuitos com Harmônicos	45
2.7.2	Corrente de <i>Inrush</i>	48
2.7.3	Desenergização dos Bancos de Capacitores	49
2.8	METODOLOGIA USADA PELAS CONCESSIONÁRIAS PARA ALOCAÇÃO DE BCs NA REDE PRIMÁRIA DE DISTRIBUIÇÃO	50
2.9	OPERAÇÃO DOS CAPACITORES AUTOMÁTICOS	53

2.9.1	Controle com Sensor de Tempo e Tensão	54
2.9.2	Elevação Causada pela Instalação dos BCs	56
2.9.3	Ajuste da Tensão	56
2.10	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
3	ALGORITMOS GENÉTICOS.....	59
3.1	INTRODUÇÃO	59
3.2	TERMINOLOGIA.....	61
3.3	CARACTERÍSTICAS GERAIS E REPRESENTAÇÃO	62
3.4	SELEÇÃO	64
3.5	OPERADORES GENÉTICOS	65
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
4	METODOLOGIA	70
4.1	INTRODUÇÃO	70
4.2	DEFINIÇÕES DE INDICADORES DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	70
4.3	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA FUNÇÃO OBJETIVO	72
4.3.1	Custos de Investimentos.....	73
4.3.2	Redução das Perdas.....	74
4.3.3	Redução da Violação de Tensão	75
4.3.4	Elevação de Consumo de Acordo com a Elevação de Tensão no Secundário.....	77
4.3.5	Composição Final da Função Objetivo	79
4.4	ACOPLAMENTO DAS BARRAS DO SECUNDÁRIO	81
4.5	CODIFICAÇÃO DO INDIVÍDUO	82
4.5.1	Codificação das Barras para BCs do Primário	82
4.5.2	Codificação das Barras para BCs do Secundário	83
4.5.3	Codificação para Potências dos BCs do Primário.....	84
4.5.4	Codificação para as Potências dos BCs do Secundário	84
4.5.5	Codificação do tipo dos BCs do Primário.....	85
4.5.6	Exemplo de Codificação	85
4.6	PROCEDIMENTO DE MEMORIZAÇÃO DE SOLUÇÕES JÁ BUSCADAS ..	86
4.7	PARÂMETROS DOS AG	87
4.8	FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	87
4.9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	88
5	TESTES E RESULTADOS	89

5.1	INTRODUÇÃO	89
5.2	CONDIÇÕES GERAIS PARA AS SIMULAÇÕES	90
5.2.1	Condições de Carga	90
5.2.2	Tensão de Saída do Alimentador	91
5.2.3	Taxa de Juros	91
5.2.4	Valor da Energia	91
5.2.5	Custos do BCs do Primário	92
5.3	SISTEMA DE 16 BARRAS	93
5.3.1	Sistema 16 Barras,Carga Constante, Rede Primária	94
5.3.2	Sistema 16 Barras, Carga Constante, Rede Secundária	95
5.3.3	Sistema 16 Barras, Carga Constante, Mista	96
5.3.4	Sistema 16 Barras, Patamar de Carga, Rede Primária.....	98
5.3.5	Sistema 16 Barras, Patamar de Carga, Rede Secundária.....	99
5.3.6	Sistema 16 Barras, Patamar de Carga, Mista.....	101
5.4	SISTEMA DE 90 BARRAS	103
5.4.1	Sistema 90 Barras, Carga Constante, Rede Primária.....	104
5.4.2	Sistema 90 Barras, Carga Constante, Rede Secundária	105
5.4.3	Sistema 90 Barras, Carga Constante, Mista	107
5.4.4	Sistema 90 Barras, Patamar de Carga, Rede Primária.....	109
5.4.5	Sistema 90 Barras, Patamar de Carga, Rede Secundária.....	110
5.4.6	Sistema 90 Barras, Patamar de Carga, Mista.....	112
5.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	115
6	CONCLUSÕES.....	116
6.1	CONCLUSÕES	116
6.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	117
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118
	APÊNDICE A – FLUXO DE POTÊNCIA.....	121
A.1	O PROBLEMA DO FLUXO DE POTÊNCIA.....	121
A.2	FLUXO DE POTÊNCIA – MÉTODO DA SOMA DAS CORRENTES.....	123
A.2.1	<i>Backward Sweep</i>	123
A.2.2	<i>Forward Sweep</i>	124
	APÊNDICE B – DADOS DO SISTEMA	125
B.1	SISTEMA DE 16 BARRAS.....	125
B.2	SISTEMA DE 90 BARRAS.....	126

APÊNDICE C – GRÁFICOS DE PATAMARES DE CARGA.....129

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tecnologias de Capacitores	36
Tabela 2.2 – Tensões de Regime Permanente de Longa Duração para BCs da Rede Primária (NBR 5282)	40
Tabela 2.3 – Temperatura de Operação dos BCs do Primário (NBR 5282).....	41
Tabela 2.4 – Tensões para Regime de Longa Duração dos BCs do Secundário	42
Tabela 2.5 – Temperatura de Operação dos BCs do Secundário (IEC-60831-1)	43
Tabela 2.6 – Montagem dos BCs na Rede de Distribuição (SADEFEM)	45
Tabela 3.1 – Terminologia.....	64
Tabela 4.1 – Níveis de Tensão.....	76
Tabela 4.2 – Tamanho de BCs no Primário	84
Tabela 4.3 – Tamanho de BCs no Secundário.....	85
Tabela 4.4 – Configuração do Ag.....	87
Tabela 5.1 – Porcentagem da Carga Total no alimentador para cada Condição	90
Tabela 5.2 – Número de Horas para Cada Condição de Carga	90
Tabela 5.3 – Número de Dias Úteis, Sábado e Domingo/Feriados num Período de um ano	91
Tabela 5.4 – Tensão de Saída da Subestação em Função dos Patamares de Carga	91
Tabela 5.5 – Valor de Energia.....	92
Tabela 5.6 – Custos dos BCs do Primário Fixo.....	92
Tabela 5.7 – Custos dos BCs do Primário Automático.....	92
Tabela 5.8 – Custos dos BCs do Secundário.....	93
Tabela 5.9 – Parâmetros p/ alocação de BCs Primário.....	94
Tabela 5.10 – Alocação dos BCs do Primário	94
Tabela 5.11 – Retornos Financeiros	94
Tabela 5.12 – Índices de retorno Financeiro	94
Tabela 5.13 – Parâmetros p/ Alocação de Secundário	95
Tabela 5.14 – Alocação dos BCs do Secundário	96
Tabela 5.15 – Retornos Financeiros	96
Tabela 5.16 – Índices de Retorno Financeiro.....	96
Tabela 5.17 – Condições de Programa dos BCs Mistos	97

Tabela 5.18 – Alocações dos BCs Mistos	97
Tabela 5.19 – Retornos Financeiros	97
Tabela 5.20 – Índices de Retorno Financeiro.....	97
Tabela 5.21 – Condições de Programa dos BCs Primário	98
Tabela 5.22 – Alocações dos BCs Primário	99
Tabela 5.23 – Retornos Financeiros	99
Tabela 5.24 – Índices de Retorno Financeiro.....	99
Tabela 5.25 – Parâmetros p/ Alocação no Secundário	100
Tabela 5.26 – Alocações dos BCs no Secundário	100
Tabela 5.27 – Retornos Financeiros	100
Tabela 5.28 – Índices de Retorno Financeiro.....	100
Tabela 5.29 – Parâmetros p/ Alocação de BCs mistos	101
Tabela 5.30 – Alocações dos BCs Mistos	102
Tabela 5.31 – Retornos Financeiros	102
Tabela 5.32 – Índices de Retorno Financeiro.....	102
Tabela 5.33 – Quadro Geral de Resultados do Sistema 16 Barras.....	103
Tabela 5.34 – Parâmetros de Alocação de BCs Primário	104
Tabela 5.35 – Alocações dos BCs Primário	104
Tabela 5.36 – Retornos Financeiros	104
Tabela 5.37 – Índices de Retorno Financeiro.....	105
Tabela 5.38 – Parâmetros p/ Alocação de BCs Secundário	105
Tabela 5.39 – Alocações dos BCs Secundário	106
Tabela 5.40 – Retornos Financeiros	106
Tabela 5.41 – Índices de Retorno Financeiro.....	106
Tabela 5.42 – Parâmetros p/ Alocação BCs Mista	107
Tabela 5.43 – Alocações dos BCs, Misto.....	108
Tabela 5.44 – Retornos Financeiros	108
Tabela 5.45 – Índices de Retorno Financeiro.....	108
Tabela 5.46 – Parâmetro p/ Alocação de BCs Primário	109
Tabela 5.47 – Alocações Dos BCs Primário.....	109
Tabela 5.48 – Retornos Financeiros	110
Tabela 5.49 – Índices de Retorno Financeiro.....	110
Tabela 5.50 – Parâmetro p/ Alocação de BCs no Secundário	111
Tabela 5.51 – Alocações dos BCs do Secundário	111

Tabela 5.52 – Retornos Financeiros	111
Tabela 5.53 – Índices de Retorno Financeiro.....	112
Tabela 5.54 – Condições Parâmetro p/ Alocação de BCs misto	113
Tabela 5.55 – Alocações dos BCs Mistos	113
Tabela 5.56 – Retornos Financeiros	113
Tabela 5.57 – Índices de Retorno Financeiro.....	114
Tabela 5.58 – Quadro Geral de Resultados do Sistema 90 Barras.....	114
Tabela A.1 – Tipos de Barras do Fluxo de Carga Convencional.....	122
Tabela B.1 – Dados das Cargas para o Sistema de 16 Barras	125
Tabela B.2 – Dados das Linhas para o Sistema de 16 Barras	125
Tabela B.3 – Dados das Cargas para o Sistema de 90 Barras	126
Tabela B.4 – Dados das Linhas para o Sistema de 90 Barras	127

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação Gráfica do Capacitor Plano	30
Figura 2.2 – Capacitor com Tecnologia PPM	32
Figura 2.3 – Capacitor com Tecnologia não PPM	34
Figura 2.4 – Banco de Capacitores com Fúsvél Externo	37
Figura 2.5 – Banco de Capacitores com Fúsvél Interno	38
Figura 2.6 – Banco de Capacitores <i>Fuseless</i>	38
Figura 2.7 – Fluxograma de Instalação dos BCs via Fusíveis (Sadefem)	39
Figura 2.8 – <i>Restrike</i> (Natarajan)	50
Figura 2.9 – Perfil do Reativo do Alimentador	52
Figura 2.10 – Curva de Operação do Sensor Tempo-Tensão	55
Figura 2.11 – Dispositivo de Tempo	55
Figura 3.1 – Exemplo de Mutação	66
Figura 3.2 – Exemplo de Cruzamento de um Ponto	67
Figura 3.3 – Exemplo de Cruzamento de Dosi Pontos	67
Figura 3.4 – Exemplo de Cruzamento Uniforme	68
Figura 3.5 – Exemplo de Cruzamento Disperso	68
Figura 3.6 – Exemplo de Elitismo	69
Figura 4.1 – Representação do VPL	72
Figura 4.2 – Níveis de Tensão	76
Figura 4.3 – VPL Considerando Apenas Alocação no Primário	80
Figura 4.4 – VPL Considerando Apenas Alocação no Secundário	80
Figura 4.5 – VPL Considerando Alocação Mista	80
Figura 4.6 – Topologia do Sistema de Distribuição	81
Figura 4.7 – Acoplamento das Barras do Secundário	81
Figura 4.8 – Representação do Indivíduo	82
Figura 4.9 – Decodificação das Barras dos BCs do Primário	83
Figura 4.10 – Decodificação das Barras dos BCs do Secundário	83
Figura 4.11 – Decodificação das Potências dos BCs do Primário	84
Figura 4.12 – Decodificação das Potências dos BCs do Secundário	85
Figura 4.13 – Exemplo de Decodificação do Indivíduo	86
Figura 4.14 – Fluxograma da Metodologia	88

Figura 5.1 – Sequência de Passos para a Simulação.....	89
Figura 5.2 – Sistema de 16 Barras.....	93
Figura 5.3 – Perfil de Tensão para Carga Constante, Primário.....	95
Figura 5.4 – Perfil de Tensão para Carga Constante, Secundário	96
Figura 5.5 – Perfil de Tensão para Carga Constante, Mista	98
Figura 5.6 – Perfil de Tensão para Patamar de Carga Dia Útil, Pesada, Primário ...	99
Figura 5.7 – Perfil de Tensão para Patamar de Carga Dia Útil, Pesada, Secundário	101
Figura 5.8 – Perfil de Tensão para Patamar de Carga Dia útil Pesada Mista	102
Figura 5.9 – Sistema de 90 Barras.....	103
Figura 5.10 – Perfil de Tensão para Carga Cosntante, Primário.....	105
Figura 5.11 – Perfil de Tensão para Carga Cosntante, Secundário	107
Figura 5.12 – Perfil de Tensão para Carga Cosntante, Mista	109
Figura 5.13 – Perfil de Tensão para Patamar de Carga Dia Útil, Pesada, Primário	110
Figura 5.14 – Perfil de Tensão para Patamar de Carga Dia Útil, Pesada, Secundário	112
Figura 5.15 – Perfil de Tensão para Patamar de Carga Dia Útil ,Pesada, Mista.....	114
Figura A.1 – Ramo de um Sistema de Distribuição.....	121
Figura C.1 – Perfil de Tensão – Primário – Média - Sábado	129
Figura C.2 – Perfil de Tensão – Primário – Média – Dom/Fer.....	129
Figura C.3 – Perfil de Tensão – Primário – Média – Útil	129
Figura C.4 – Perfil de Tensão – Primário – Média – Sábado	130
Figura C.5 – Perfil de Tensão – Primário – Média – Dom/Fer.....	130
Figura C.6 – Perfil de Tensão – Primário – Leve – Útil	130
Figura C.7 – Perfil de Tensão – Primário – Leve – Sábado	131
Figura C.8 – Perfil de Tensão – Primário – Leve – Dom/Fer.....	131
Figura C.9 – Perfil de Tensão – Primário – Pesada – Sábado	131
Figura C.10 – Perfil de Tensão – Primário – Pesada – Dom/Fer	132
Figura C.11 – Perfil de Tensão – Secundário – Média – Útil.....	132
Figura C.12 – Perfil de Tensão – Secundário – Média – Sábado.....	132
Figura C.13 – Perfil de Tensão – Secundário – Média – Dom/Fer	133
Figura C.14 – Perfil de Tensão – Secundário – Leve – Útil.....	133
Figura C.15 – Perfil de Tensão – Secundário – Leve – Sábado.....	133
Figura C.16 – Perfil de Tensão – Secundário – Leve – Dom/Fer.....	134

Figura C.17 – Perfil de Tensão – Mista – Pesada – Sábado.....	134
Figura C.18 – Perfil de Tensão – Mista – Pesada – Dom/Fer	134
Figura C.19 – Perfil de Tensão – Mista – Média – Útil	135
Figura C.20 – Perfil de Tensão – Mista – Média – Sábado	135
Figura C.21 – Perfil de Tensão – Mista – Média – Dom/Fer	135
Figura C.22 – Perfil de Tensão – Mista – Leve – Útil	136
Figura C.23 – Perfil de Tensão – Mista – Leve – Sábado	136
Figura C.24 – Perfil de Tensão – Mista – Leve – Dom/Fer	136
Figura C.25 – Perfil de Tensão – Primário – Pesada – Sábado	137
Figura C.26 – Perfil de Tensão – Primário – Pesada – Dom/Fer	137
Figura C.27 – Perfil de Tensão – Primário – Média – Útil	137
Figura C.28 – Perfil de Tensão – Primário – Média – Sábado	138
Figura C.29 – Perfil de Tensão – Primário – Média – Dom/Fer.....	138
Figura C.30 – Perfil de Tensão – Primário – Leve – Útil	138
Figura C.31 – Perfil de Tensão – Primário – Leve – Sábado	139
Figura C.32 – Perfil de Tensão – Primário – Leve – Dom/Fer.....	139
Figura C.33 – Perfil de Tensão – Secundário – Pesada– Sábado	139
Figura C.34 – Perfil de Tensão – Secundário – Pesada– Dom/Fer.....	140
Figura C.35 – Perfil de Tensão – Secundário – Média– Útil.....	140
Figura C.36 – Perfil de Tensão – Secundário – Média– Dom/Fer	140
Figura C.37 – Perfil de Tensão – Secundário – Média– Dom/Fer	141
Figura C.38 – Perfil de Tensão – Secundário – Leve– Útil.....	141
Figura C.39 – Perfil de Tensão – Secundário – Leve– Sábado.....	141
Figura C.40 – Perfil de Tensão – Secundário – Leve– Dom/Fer.....	142
Figura C.41 – Perfil de Tensão – Mista – Pesada– Sábado.....	142
Figura C.42 – Perfil de Tensão – Mista – Pesada– Dom/Fer	142
Figura C.43 – Perfil de Tensão – Mista – Média– Útil	143
Figura C.44 – Perfil de Tensão – Mista – Média– Sábado	143
Figura C.45 – Perfil de Tensão – Mista – Média– Dom/Fer	143
Figura C.46 – Perfil de Tensão – Mista – Leve– Útil	144
Figura C.47 – Perfil de Tensão – Mista – Leve– Sábado	144
Figura C.48 – Perfil de Tensão – Mista – Leve– Dom/Fer	144

LISTA DE SIGLAS

AGs	Algoritmos Genéticos
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
BB	<i>Branch and Bound</i>
BCs	Bancos de Capacitores
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
DRC	Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica
DRP	Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária
FO	Função Objetivo
FP	Fluxo de Potência
IA	Inteligência Artificial
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
NBR	Norma Brasileira
P	Potência ativa
PPM	Polipropileno Metalizado
PQ	Barra de Carga
PV	Barra de Tensão Controlada
Q	Potência Reativa
RT	Regulador de Tensão
SDC	Soma das Correntes
SE	Subestação
SELIC	Sistema Especial de Liquidação e Custódia
TA	Tensão de Atendimento
TC	Tensão Contratada
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TN	Tensão Nominal
TP	Transformador de Potencial
TR	Tempo de Retorno

VPL	Valor Presente Liquido
V0	Barra de Referência

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área das placas do capacitor
A_4	valor da energia do subgrupo convencional (2,3 kV a 25 kV)
A_{3a}	valor da energia do subgrupo convencional (30 kV a 44kV)
α	conjunto das barras candidatas à alocação de capacitores no secundário
B	banda de ajuste do BC
BEN	benefício
b_k^{sh}	susceptância <i>shunt</i> na barra k
BP	barras do primário (representam os postes dos alimentados)
BS	barras do secundário (representam os postes dos alimentadores que possuem transformadores)
b_k^{sh}	susceptância <i>shunt</i> na barra k
C	capacitância
C_{ac}	custo do aumento de consumo nas barras do secundário
C_o	montante a ser aplicado na data zero
C_i	fluxo de caixa na data i
CI	custo de investimento
C_m	conjunto de barras alimentadas pela barra m
Co_j^{fixo}	custo fixo de instalação de capacitor fixo no primário
Co_j^{aut}	custo fixo de instalação de capacitor automático no primário
Co_s	custo fixo de instalação de capacitor fixo no secundário
CP	custo das perdas de energia no primário e secundário
CV_t	custo de violação de tensão
ΔV	elevação de tensão provocada pelo BC
$\Delta Energia_1$	variação de energia no primário
$\Delta Energia_2$	variação de energia no secundário
e	espessura do dielétrico
e_t	espessura do dielétrico mais espessura das placas
F	valor futuro

f	freqüência da rede
φ	conjunto das barras candidatas à alocação de capacitores no primário
i	corresponde a condição de carga pesada, média e leve
I_{km}	corrente que sai da barra k em direção a barra m
I_m	corrente solicitada pela carga da barra m
I_n	corrente nominal
I_3	corrente de curto-circuito trifásico no ponto de instalação do banco de capacitor
j	corresponde ao número de dias úteis, sábados ou domingos/feriados
l	comprimento das placas
L	largura entre placas
L_{eq}	indutância total equivalente por fase entre os bancos de capacitores
k	índice de cada barra do sistema
k	constante dielétrica do material entre placas
kVAcc	potência de curto-circuito no ponto de instalação do banco de capacitores
N	ordem de harmônica de ressonância
n	período
nlc	número de leituras situadas na faixa crítica
nlp	número de leituras situadas na faixa precária
θ_k	ângulo da tensão da barra k
Ω_k	conjunto de barras ligadas à barra k
P_k	potência ativa líquida injetada na barra k
P_{km}	fluxo de potência ativa que sai da barra k em direção a barra m
Ψ_V	é o aumento de tensão em pu ($V_{final} / V_{inicial}$)
Ψ_P	é o aumento de tensão em pu ($P_{final} / P_{inicial}$)
Q_c	potência total do BC
Q_k	potência reativa líquida injetada na barra k
Q_{km}	fluxo de potência reativa que sai da barra k em direção a barra m
Q_k^{sh}	potência reativa devido ao elemento <i>shunt</i>
r	taxa de juros

RTP	relação de transformação do TP que alimenta o controle (normalmente igual a 120)
S_m	potência da carga da barra m
U_n	valor médio mais elevado durante um período qualquer de energização do capacitor, considerando-se o aumento da tensão provocada pela ligação do banco e o perfil de tensão local de instalação
V	volume da parte ativa do capacitor
V_{aj}	tensão ajustada
V_{ff}	tensão fase-fase
V_k	módulo da tensão na barra k
V_m	módulo da tensão na barra m
V_n	valor nominal de tensão do circuito
V_{off}	tensão de referência para desligar o BC
V_{on}	tensão de referência para ligar o BC
ω	freqüência angular da rede em radianos
X_c	reatância
X_t	reatância total entre BC e a subestação
Z	impedância de inserção do transformador
Z_{km}	impedância do ramo km

RESUMO

Devido ao aumento crescente do consumo de energia elétrica, as concessionárias de distribuição de energia elétrica enfrentam dificuldades para controlar o fator de potência do sistema de distribuição, manter níveis de tensões adequados e patamares aceitáveis de perdas ativas do sistema. Para mitigar esses problemas utilizam-se equipamentos para fazer a racionalização da potência reativa do sistema, os Bancos de Capacitores (BCs). Neste trabalho, busca-se otimizar a alocação de BCs em redes primária e secundária de sistemas de distribuição baseada em Algoritmos Genéticos (AGs), juntamente com o método de fluxo de potência das somas das correntes (SDC). A estratégia adotada via AGs para alocação dos BCs, nos circuitos primário e secundário de uma rede de distribuição, contempla as condições de simulação: alocação apenas no circuito primário, alocação apenas no circuito secundário e alocação mista; escolha do tipo de BC (fixo ou automático); tamanho do BC (kvar) e local de instalação (barra). A formulação matemática para esta metodologia é baseada em critérios de minimização dos custos das perdas de potência ativa, das penalizações por violação de tensão, dos custos dos equipamentos e maximização do aumento do consumo nas cargas dos circuitos secundários. Os resultados para a metodologia proposta são apresentados para sistemas de distribuição (13,8 kV/127 V) radiais de 16 e 90 barras.

Palavra chave: Alocação de bancos de capacitores, Rede primária de distribuição, Rede secundária de distribuição, Algoritmos Genéticos, Valor Presente Líquido.

ABSTRACT

Due to the increasing consumption of electrical power, the power utilities have difficulties to control the power factor of the distribution systems, maintain adequate voltage levels and acceptable active power losses. In order to mitigate reactive power problems, utilities install Capacitor Banks (CB) in their distribution systems. The aim of this work is to optimize CB's allocation in medium and low voltage systems using Genetic Algorithm together with the Sum of Currents Power Flow (SOC). The strategy of using GA to allocate CB in the primary or secondary distribution network includes the following assumptions: CB allocation only in the primary system, CB allocation only in the secondary system or allocation in both systems, the selection of the type of CB (fixed or automatic), reactive power (kVAr) and the place of installation (bar). The mathematical formulation used in this approach is based on the criteria of minimum costs due to active power losses, penalties due to violation of voltage levels, the total cost of the equipments and the maximization of the increase on the power consumed in the secondary loads. The results obtained using the proposes methodology are presented for a radial distribution system (13,8 kV/127 V) with 16 and 90 bars.

Keywords: Allocation of Capacitor Banks, Primary Distribution Network, Secondary Distribution Network, Genetic Algorithm, Net Present Value.

1 INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Com o aumento do consumo de energia elétrica no Brasil, o rigor de fiscalização pela qualidade de energia elétrica na área de distribuição de energia, torna-se cada vez mais intensificado através do órgão competente, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

A necessidade de se ter controle do fator de potência e níveis de tensão dentro das normas da ANEEL (Resoluções 456/2000 e 505/2001) faz com que concessionárias de distribuição de energia busquem técnicas para alocação de dispositivos na rede de modo a se adequarem às disposições previstas na resolução. Uma das possibilidades para solução desse problemas é a alocação de bancos de capacitores (BCs) nos circuitos primário e secundário das redes de distribuição de energia elétrica.

No entanto, o problema de alocação de BCs em redes de distribuição é não linear e de programação inteiro-misto. O termo não-linear deve-se a solução das equações de fluxo de potência e o termo inteiro-misto, por envolver variáveis de decisão (instalação ou não de BCs) e de variáveis discreta (potência dos BCs a serem instalados).

Esta dissertação almeja desenvolver uma metodologia para alocação de BCs em circuitos primário e secundário da rede de distribuição de energia, verificando o desempenho dos mesmos quanto ao suporte de reativo, melhoria nos níveis de tensão e redução de perdas no sistema de distribuição.

Para a otimização da alocação foi utilizada a técnica de algoritmos genéticos (AGs) juntamente com o método de fluxo de potência monofásico por soma das correntes (SDC) para quantificação dos parâmetros elétricos empregados na função objetivo (FO) dos AGs.

Com o desenvolvimento desta nova metodologia para alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição, pretende-se munir as concessionárias de distribuição de energia elétrica de uma ferramenta extremamente eficiente e

inovadora para a otimização de reativos e melhoria do perfil de tensão de suas redes de distribuição.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma metodologia quanto à melhor forma de racionalização de reativo envolvendo a rede primária e secundária da rede de distribuição de energia elétrica. Para isso, pretende-se avaliar técnicas de análise de fluxo de potência (Método da Somas das Correntes) e inteligência artificial (Algoritmos Genéticos) para otimizar o desempenho do sistema de distribuição de energia elétrica. Com base nos resultados desta metodologia, as concessionárias de distribuição de energia elétrica terão a oportunidade de suprir suas cargas com um alto nível de qualidade de energia, referente principalmente a níveis de tensão, perdas elétricas e compensação de reativo de acordo com as resoluções vigentes da ANEEL

Para tanto os objetivos específicos desta dissertação incluem:

- Realizar um levantamento do estado-da-arte sobre alocações de BCs em redes de distribuição de energia elétrica;
- Implementar metodologia de fluxo de potência (FP) para simular sistemas de distribuição contemplando circuitos primário e secundário;
- Desenvolver metodologia de alocação de BCs em redes primárias e secundárias;
- Validar a metodologia com circuitos de distribuição.

1.3 ESTADO DA ARTE

A literatura sobre alocação de bancos de capacitores é bastante extensa sendo apresentado, a seguir, alguns dos trabalhos mais importantes.

Baran e Wu (1989) dividiu o problema de alocação de capacitores em mestre e escravo, ou seja, propôs que a localização e quantidade dos BCs fosse o problema mestre e que o tipo (fixo e automático) e tamanho fosse o problema escravo. O processo proposto é hierárquico consistindo em encontrar a solução do

topo (problema mestre) para o qual utilizava a base (problema escravo) objetivando-se a redução de perdas de energia e custos de equipamentos.

Sundhararajan e Pahwa (1993) desenvolveu uma metodologia para alocação de BCs considerando suas características clássicas (tamanho, localização, tipo e números de capacitores) juntamente com AGs. A metodologia consistiu em resolver o seguinte problema de otimização de custos e perdas:

$$\min K_e \left(\sum_{i=1}^n T_i * P_i \right) + K_p * P_o + K_c \sum_{j=1}^M C_j \quad (1.1)$$

onde: K_e : custo da energia perdida;

T_i : período (n intervalo de tempo);

P_i : potência geradora da energia perdida;

K_p : custo da perda máxima;

P_o : potência geradora da perda máxima;

K_c : custo dos capacitores;

C_j : tamanho dos BCs;

M: Número de barras candidata a alocação de BCs.

Para a redução do espaço de busca da solução ótima utilizou-se a análise de sensibilidade a partir do Jacobiano (J):

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \text{Perdas}}{\partial P} \\ \frac{\partial \text{Perdas}}{\partial Q} \end{bmatrix} = J^t \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial \text{Perdas}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial \text{Perdas}}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Os resultados mostram que os AGs chegaram bem próximo do ótimo global embora tivesse grande tempo de processamento, outra característica relevante é que os AGs mostraram-se ser uma ferramenta robusta e eficaz para alocação dos BCs.

Após alguns anos, Bala *et al.* (1997) também realizou estudos com análise de sensibilidade, desenvolvendo um sistema DAR (*Distribution-Analyzer-Recorder*) que consistiu em reduzir o espaço de busca para a solução do problema de alocação dos BCs. Os resultados indicaram que a instalação dos BCs fixos tiveram melhores relação custo-benefício e também porque sua metodologia tinha grande potencial de

contribuição para as áreas de expansão e planejamento da distribuição de energia elétrica.

Huang *et al.* (1996) fizeram comparação entre as técnicas de busca Tabu e Recozimento Simulado para alocação de BCs, concomitante às técnicas, foi feita a aplicação de análise de sensibilidade para reduzir os espaços de busca dos algoritmos. Os resultados aferidos mostraram que a busca Tabu encontrou soluções bem próximos do ótimo e também uma redução significativa de tempo computacional em relação ao Recozimento Simulado.

Chiang e Darling (1997) dividiram em dois estágios o problema de alocação, substituição e controle em larga escala de BCs, o primeiro estágio busca a melhor solução via AGs e o segundo estágio com aplicação de técnicas heurísticas fazia sua aplicação de modo a fugir do incômodo dos mínimos locais do sistema. O sistema estudado consistia em 292 barras e mostrou resultados promissores.

Delfanti *et al.* (2000) modelaram um problema de otimização para alocação de BCs que minimiza custo fixo de instalação e custo proporcional ao tamanho dos capacitores. Para resolvê-lo utilizou técnicas de BB (*Branch and Bound*), algoritmo microgenético, e um algoritmo misto das duas técnicas (sistema híbrido).

Ng *et al.* (2000) utilizaram várias técnicas para alocação de BCs em rede de distribuição. As técnicas envolveram métodos analíticos, numéricos, heurísticos e de inteligência artificial. Todos eles apresentaram características particulares que dependem da complexidade, precisão, localização e praticidade de instalação dos capacitores.

Em Gallego *et al.* (2001), propôs-se uma solução híbrida utilizando busca Tabu, Inteligência Artificial (IA) e métodos heurísticos para alocação de BCs contemplando tipo, tamanho, localização e controle. A função objetivo contemplava custo das perdas e custo do investimento num dado período. Foram utilizados dois tipos de capacitores fixos e automáticos para sistemas testes de 9, 69 e 135 barras obtendo bons resultados.

Mendes *et al.* (2001), utilizaram Algoritmo Memético para acelerar o desempenho de busca para o problema de localização e tamanho dos BCs cuja função objetivo se constituía de redução de perdas ativas, minimização de BCs juntamente com seus ônus de instalação, contemplando um orçamento pré-definido e sua amortização num dado período de tempo pelas distribuidoras de energia.

Sousa (2003) utilizou os Multiplicadores de Lagrange do Fluxo de Potência Ótimo (FPO) para fazer alocação de reativos nas redes de distribuição. O método consistiu basicamente em simular um fluxo de carga convencional e enquadrar seus resultados em duas situações, a primeira, condizente com padrões ótimos, na segunda situação era feita uma análise dos Multiplicadores de Lagrange associados a restrições de igualdade de potência reativa. Os pontos do sistema com Multiplicadores de Lagrange com maior sensibilidade em relação à potência reativa eram adotados como barras candidatas à alocação de reativo.

Yamakawa (2007) propôs um sistema de controle de BCs automáticos via sistema nebuloso, tendo melhores resultados que o uso de técnicas tradicionais. No entanto, esse trabalho não abordou o problema de alocação dos BCs.

Em Beê (2007), o problema de alocação de BCs em redes primárias tratou, além das modelagens clássicas, como as perdas elétricas e custos dos equipamentos, as penalizações de violação dos limites de tensão, as quedas de tensão acentuadas e a minimização de correntes de *inrush*. A busca das soluções foi realizada através dos AGs, que se mostrou uma ferramenta robusta, com bons resultados apresentados para sistemas de 11 e 70 barras.

Recentemente, Szuvovivski (2008) combinou a alocação de BCs e reguladores de tensão (RTs) para um melhor desempenho da rede de distribuição em termos de níveis de tensão. Os critérios que foram otimizados são praticamente os mesmos de Beê (2007) exceto a minimização de correntes de *inrush*. As ferramentas empregadas para alocação de BCs foi o método de fluxo de potência SDC juntamente com AGs. Contudo também foi criada a possibilidade de alocar RTs simultaneamente com BCs, utilizando o FPO resolvido pelo Método Primal-Dual de Pontos Interiores (MPDPI). Os resultados foram qualitativamente os mesmos quando usado FPO e SDC, entretanto verificou-se que o método SDC teve velocidade de convergência maior, enquanto o FPO comportou-se mais eficientemente para especificar os *taps* dos RTs.

Como se pode observar, todos os trabalhos descritos alocam BCs apenas na rede primária, não havendo nenhum estudo que contemplem análise dos benefícios advindos da alocação de BCs na rede secundária.

1.4 FLUXO DE POTÊNCIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Os AGs utilizados para alocar os BCs (primário e secundário) requerem uma avaliação elétrica de cada solução gerada. Para que se faça essa avaliação é necessária a obtenção do novo estado da rede com a instalação dos equipamentos selecionados a fim de verificar as perdas e a melhora no perfil de tensão, ou seja, é necessária a resolução de um fluxo de potência. Assim alguns estudos são mencionados a seguir.

Shirmohammadi *et al.* (1988) conseguiu uma melhor solução para sistemas fracamente malhados do que o método Newton-Raphson. O método consistiu em transformar o sistema fracamente malhado em puramente radial aplicando as leis de Kirchhoff de tensão e corrente.

Srinivas (2000) explanou a necessidades de diferentes métodos para a solução do fluxo de carga do sistema de distribuição, as características abordadas foram que o sistema deve ser puramente radial ou quase radial, baixa relação de reatância por resistência (X/R), carga desequilibrada ao longo do alimentador e carga distribuída. Os métodos considerados são “Varredura Frente e Trás” e “Impedância Nodal Implícita”.

Vários métodos eficientes para a solução do problema de fluxo de potência em redes de distribuição radiais estão disponíveis na literatura especializada. Esses métodos estão divididos em duas grandes categorias: método da “Soma das Correntes (SDC)” ou “Soma das Potências (SDP)” e método baseado na “Impedância Nodal Implícita”.

O método da “Soma das Correntes”, proposta inicialmente por Shirmohammadi *et al.* (1988) é baseado em corrente, e está formulado no Apêndice A. Já o método da “Soma das Potências”, proposta inicialmente por Broadwater *et al.* (1988), é similar ao SDC, porém é baseado na análise das potências.

Chen *et al.* (1991) realizou uma análise bem detalhada dos métodos de fluxo de potência para sistemas de distribuição considerando a rede primária e secundária. O método proposto neste trabalho é baseado na matriz impedância nodal (\dot{Y}_{barra}) e é adequado para sistemas malhados.

Para esta dissertação o método de fluxo de potência utilizado foi o SDC, o qual trabalha diretamente com as correntes, outra característica importante é sua maior velocidade de convergência, segundo Szuvovivski (2008).

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos, onde o Capítulo 1 é composto pela introdução, objetivos, estado-da-arte e estrutura da dissertação. O Capítulo 2 descreve as diferenças de tecnologias, tipos e especificações de capacitores empregados nos circuitos primário e secundário de redes de distribuição. O Capítulo 3 detalha fundamentos dos Algoritmos Genéticos (AGs), descrevendo sua fundamentação, características, parâmetros e operadores.

O Capítulo 4 descreve a metodologia adotada para a solução do problema com o detalhamento da formulação matemática da função objetivo utilizada. O Capítulo 5 mostra os testes e resultados obtidos para os sistemas de 16 e 90 barras e por fim o Capítulo 6 apresenta as conclusões referentes ao trabalho proposto.

2 CAPACITORES DE POTÊNCIA

2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo mostrar as diferenças e similaridades entre capacitores de redes de distribuição primária e secundária contemplando tecnologias, tipo e características de especificação dos capacitores aplicados no sistema de energia elétrica, além de descrever metodologias existentes quanto sua alocação e regras práticas de instalação.

2.2 CONCEITO DE CONSTRUÇÃO BÁSICO DE CAPACITORES

É sabido que os capacitores de potência são elementos estáticos cuja inserção em circuitos de transmissão e distribuição de energia elétrica tem o intuito de racionalizar o consumo de potência reativa a ser fornecida pela geração.

Devido aos parâmetros físicos impostos pela teoria de projeto, os capacitores de potência são dimensionados a partir de duas variantes primordiais:

- a) Tensão de utilização: defini a espessura do material dielétrico a ser utilizado na parte ativa do capacitor (entre placas), sendo, portanto de fator preponderante para a definição das características dimensionais do equipamento;
- b) Potência de serviço: defini a área das folhas de material que compõem a parte ativa do capacitor (placa + dielétrico), que associada com a espessura do dielétrico, defini o “volume capacitivo”, ou seja, as dimensões do tanque do capacitor.

Assim, a potência é formulada como:

$$Potência \approx Capacitância = \frac{A}{e} = k \cdot \frac{L \cdot I}{e} \quad (2.1)$$

onde: A: Área das placas;

e: Espessura do dielétrico (define o poder de isolamento, ou seja, a tensão de trabalho em regime permanente);

k: Constante dielétrica do material entre placas;

L: Largura das placas;

l: Comprimento das placas (define o valor de capacitância, a partir de um determinado valor de “e”).

E, o volume capacitivo como:

$$V = A \cdot e_t = L \cdot l \cdot e_t \quad (2.2)$$

onde: L: Largura das placas;

l: Comprimento das placas;

e: Espessura do dielétrico;

C: Capacitância;

V: Volume da parte ativa do capacitor;

e_t : Espessura do dielétrico + espessura das placas.

Desta forma, pode-se concluir que quanto menor for a potência (ou capacitância) de um capacitor, menor tende a ser seu volume, uma vez que as dimensões relativas à área de placas (área ativa ou área de posição ativa) é que determina o volume do capacitor.

E ainda, quanto maior for o poder de isolamento entre placas do capacitor (considerando a utilização de um mesmo tipo de material dielétrico), maior tende a ser a espessura do dielétrico, traduzindo também em um aumento de volume.

Qualquer tipo de capacitor elétrico tem sua parte ativa formada por duas placas (ou armaduras) de material condutor separadas por um material com características isolantes (dielétrico), conforme Figura 2.1.

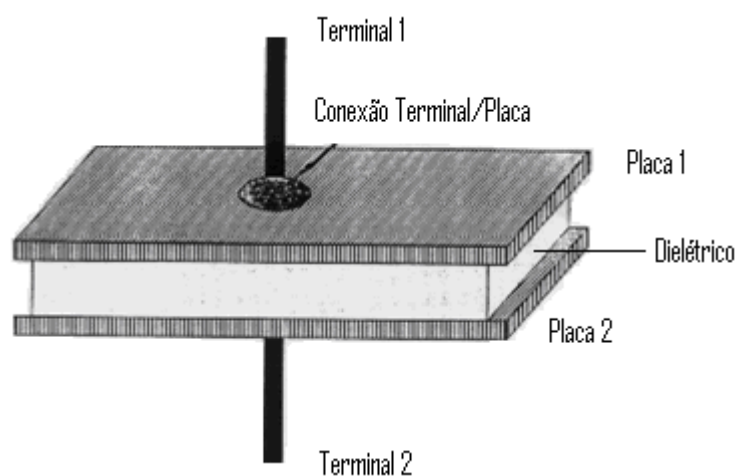


FIGURA 2.1 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO CAPACITOR PLANO

A propriedade de suportar tensão no capacitor é determinada pelo material utilizado na composição do dielétrico (tipo de isolante e espessura do mesmo). Para um determinado material isolante de características uniformes, quanto maior for a espessura do dielétrico, maior será sua capacidade de suportar tensão.

A propriedade de suportar corrente no capacitor é determinada pela quantidade das conexões condutor/placa e pelo tipo de material utilizado na composição das placas (tipo de condutor e espessura do mesmo). Logo, para um determinado material condutor de características uniforme, quanto maior for a espessura da placa, maior será a capacidade de conduzir corrente e prover melhor conexão com o terminal.

2.3 PRINCIPAIS TIPOS DE CAPACITORES

2.3.1 Capacitores PPM (Polipropileno Metalizado)

Em baixa tensões (≤ 1.000 V), a tecnologia mundial de fabricação de capacitores a seco e imerso em óleo utiliza na composição do dielétrico um filme de polipropileno como isolamento entre placas.

Cada filme de polipropileno possui em uma das suas superfícies uma fina película de metalização com liga de alumínio-zinco (AL/Zn) para compor uma das placas do capacitor. A utilização de mais de um filme de polipropileno fornece a outra placa do capacitor e serve como segundo dielétrico (duplo enrolamento), Figura 2.2.

Apesar da espessura do filme metalizado se situar entre 5 a 12 μm (para atender as tensões acima), são necessárias grandes áreas de placas para atingir potências significativas. Por razão de necessidades dimensionais utiliza-se normalmente um enrolamento (bobina) do conjunto placa mais dielétrico, para formar um capacitor básico, comumente chamado de elemento capacitivo ou bobina capacitiva.

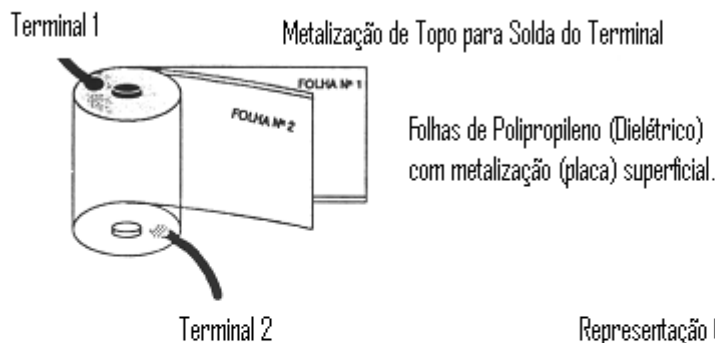
Em condições adversas, os pontos de conexão elétrica do capacitor e suas placas tendem a apresentar pontos de auto-regeneração, ou seja, transição de estado do material da placa de condutor (Alumínio-Zinco) para isolante (Óxido de Alumínio ou Óxido de Zinco), diminuindo a potência da parte ativa.

Para este tipo de situação da rede é recomendada a utilização de material dielétrico NÃO-PPM, com reforços no dielétrico e nas placas para permitir a operação em regime permanente, sem prejuízo da vida útil dos capacitores.

Também por razões de melhor aproveitamento de espaço, o capacitor trifásico é obtido a partir da associação em triângulo (ou estrela) de capacitores básicos. Entretanto, é seguro afirmar que as propriedades fundamentais do capacitor são obtidas a partir da forma como o elemento capacitivo é dimensionado e fabricado.

O tipo de projeto acima detalhado é designado de capacitor em PPM (Polipropileno Metalizado), e atende à maioria das aplicações de baixa tensão atualmente. Tal capacitor é designado a seco quando o elemento capacitivo é colocado dentro de uma caneca envolto por uma resina endurecida, e imerso quando mergulhado em uma caneca envolto por óleo biodegradável visando melhorar a troca de calor do elemento com meio ambiente.

Exemplo de Elemento Capacitivo (Bobina) com
Dielétrico de Polipropileno Metalizado (PPM)



Representação Gráfica de uma Camada
do Enrolamento da Bobina Capacitiva



FIGURA 2.2 – CAPACITOR COM TECNOLOGIA PPM

Entretanto, em situações onde existam condições adversas do sistema elétrico, tais como, surto de tensão, sobretensões de regime, correntes e tensões harmônicas significativas, alta temperatura ambiente, etc., é recomendável que seja realizado estudo complementar sobre a viabilidade da aplicação deste tipo de projeto de capacitores, pois é provável uma grande diminuição da vida útil do equipamento submetido a essas condições operativas.

2.3.2 Capacitores NÃO-PPM

Os capacitores de potência impregnados em óleo para baixa tensão, com tecnologia NÃO-PPM, foram desenvolvidos baseados na tecnologia de capacitores de média tensão para aplicação em circuitos onde é desejada uma robustez dielétrica adicional, em virtude de condições adversas decorrentes das características própria do sistema, tais como, sobretensões periódicas ou de regime, surto de tensão, transitórios, harmônicos, etc.

Tais capacitores, devido a sua característica construtiva com a utilização de duas folhas de alumínio como placas condutoras e duas folhas de polipropileno e óleo biodegradável compondo o meio dielétrico, possuem uma suportabilidade muito superior aos problemas de sistema acima relatados, se comparados aos capacitores com tecnologia PPM, Figura 2.3.

Exemplo de Elemento Capacitivo (Bobina) com
Dielétrico Duplo - Placa de Folha de Alumínio - Impregnado à óleo



Óleo Isolante que Preenche Totalmente o Capacitor e
Faz Parte do Dielétrico, Refrigerando as Placas e
Auxiliando a Isolação

Representação Gráfica de uma Camada
do Enrolamento da Bobina Capacitiva



FIGURA 2.3 – CAPACITOR COM TECNOLOGIA NÃO PPM

2.3.3 Comparativo Técnico entre Capacitores do Tipo PPM e NÃO-PPM

Como visto anteriormente, os capacitores de potência utilizados para correção de fator de potência, são comumente fabricados com elementos constituídos por Polipropileno Metalizado (PPM) e não Polipropileno Metalizado (NÃO-PPM).

Devido às características de fabricação, os elementos formadores dos capacitores em PPM são cilíndricos, resultado do enrolamento de um par de folhas de filme metalizado. Para garantir boas características técnicas no elemento, o enrolamento deve ser feito bem justo, para restringir a existência de ar e conseqüentemente oxidação das placas do capacitor.

O filme de Polipropileno Metalizado varia de 5 a 12 μm , dependendo da tensão nominal no capacitor, ao passo que a espessura da metalização do filme varia de 0,015 a 0,025 μm .

Os capacitores PPM podem ser fabricados a seco (elemento envolto em resina epóxi) ou imerso em óleo (elementos ficam com as superfícies externas imersas em óleo).

Alguns fabricantes de capacitores PPM impregnados, afirma que para que haja a impregnação, há a necessidade de espaço entre as placas condutoras e os filmes de polipropileno permitindo a penetração do óleo dielétrico, bem como a utilização de vácuo, o que não ocorre para este tipo de capacitor, como descrito anteriormente.

No caso destes capacitores PPM ditos imersos ou impregnados, o óleo dielétrico tem contato apenas com as partes externas dos elementos capacitivos, propiciando melhores condições térmicas nas regiões de contato elétrico e na superfície externa do elemento, otimizando somente a dissipação de calor dos mesmos.

Já os capacitores com tecnologia NÃO-PPM são fabricados com tecnologia e materiais totalmente diferentes do projeto PPM, utilizando dielétrico duplo (duas camadas), composto por folhas não metalizadas de papel Kraft Terlo (uma folha) e filme de polipropileno corrugado (uma folha); as placas dos capacitores são formadas por folhas de alumínio (e não por metalização), o que confere maior espessura para condução de corrente nos pontos críticos e maior suportabilidade térmica.

Os elementos formadores dos capacitores NÃO-PPM são enrolados com folga para garantir a boa impregnação de dielétrico e placas com óleo (o óleo isolante é impregnado a vácuo nos elementos capacitivos fazendo parte efetiva do dielétrico, estando presente em todos os pontos internos do capacitor, e não somente nas superfícies externas dos elementos), conferindo grandes propriedades de dissipação de calor e excelente rigidez para o dielétrico. Resume-se a seguir algumas características técnicas básicas que diferenciam capacitores PPM e NÃO-PPM, conforme Tabela 2.1 – Tecnologias de Capacitores.

TABELA 2.1 – TECNOLOGIAS DE CAPACITORES

CARACTERÍSTICA	CAPACITOR PPM	CAPACITOR NÃO PPM	VANTAGEM NÃO PPM
Dielétrico (Tensão Suportável)	01 camada de isolação sem participação do óleo isolante na composição	02 camadas de folhas com participação do óleo isolante na composição	Dupla isolação, maior tensão suportável, eliminação de descargas parciais pontuais
PLACAS (Capacidade de Condução de Corrente)	Placa (condutor) de espessura média igual a 0,02 μm	Placa (condutor) de espessura média igual a 5,0 μm	Capacidade de condução de corrente extremamente maior
ÓLEO (Dissipação de calor e eliminação de pontos de alto aquecimento)	Tem contato somente com as superfícies externas (não tem contato com placas e dielétrico)	Penetra totalmente nas placas e dielétrico	Melhor refrigeração do dielétrico e placas, eliminação de pontos quentes localizados

2.4 TIPOS DE BANCOS DE CAPACITORES

Segundo Natarajan (2005), os BCs são classificados em três tipos:

- Bancos de capacitores com fusível externo;
- Bancos com fusível interno;
- Bancos sem fusível (*fuseless*).

2.4.1 Bancos de Capacitores com Fusível Externo

Bancos de capacitores com fusível externo são empregados na rede de distribuição de energia elétrica (padrão brasileiro), seu uso consiste em várias unidades capacitivas em paralelo dentro de um grupo série (Figura 2.4), para ficar dentro da tolerância do kvar fornecido no caso de uma falha sob condições normais de operação. Os pontos relevantes deste tipo de BCs contemplam alguns aspectos, dentre eles, tem-se a proteção de todo o conjunto, indicação visual de falha,

tecnologia com amplo domínio e utilização mundial. Por outro lado limita o tamanho do capacitor ($I_n \geq 60$ A) e está sujeito a falhas intempestivas.



FIGURA 2.4 – BANCO DE CAPACITORES COM FÚSIVEL EXTERNO
(CORTESIA DE SADEFEM)

2.4.2 Bancos de Capacitores com Fusível Interno

Estes BCs empregam fusíveis limitadores de corrente destinados a isolar elementos de unidades capacitivas danificadas e permite a operação dos elementos remanescentes dentro da unidade capacitiva (Figura 2.5). Quando um elemento se danifica a sua isolação subsequente remove apenas uma pequena parte da unidade capacitiva e permite que o banco permaneça em funcionamento. Dentre suas características positivas, destacam-se: falha dielétrica que é limitada a uma pequena porção da unidade, facilidade das conexões externas e eliminação do barramento. Em contrapartida é somente viável para potência superior a 300 kvar e tensões em torno de 8 kV, possui maiores perdas internas, não há indicação visual de falhas e apresenta desbalanço para baixas correntes.



FIGURA 2.5 – BANCO DE CAPACITORES COM FÚSIVEL INTERNO
(CORTESIA DE SADEFEM)

2.4.3 Bancos de Capacitores sem Fusível (*Fuseless*)

A utilização de BCs sem fusível elimina a utilização do mesmo, sendo que o uso de BCs com fusível interno e externo tem se tornado secundário devido a alta qualidade dos materiais de isolamento usados atualmente em capacitores. Seus pontos positivos envolvem a redução de perdas, eliminação do risco de falhas do fusível, menor risco de explosão e simplicidade das conexões. Entretanto, tem maiores dificuldades para sua verificação visual e é aplicável somente em BCs com tensão superior a 34,5 kV (Figura 2.6).

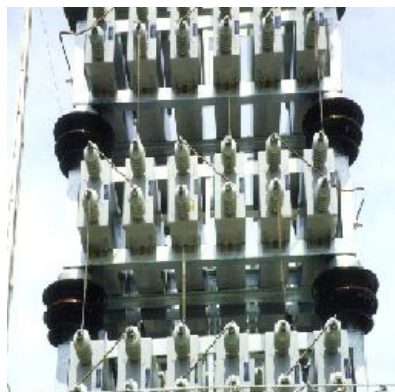
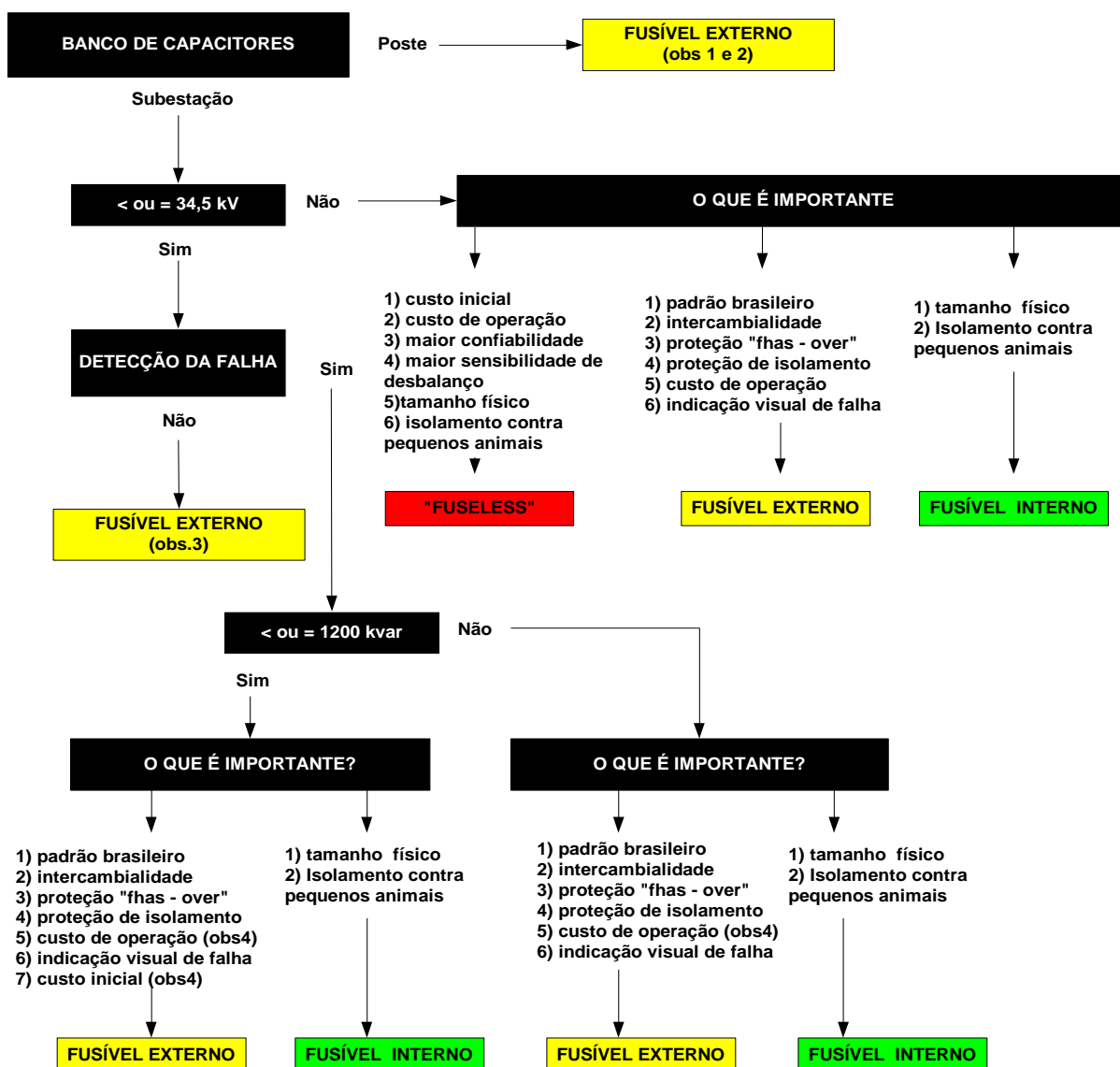


FIGURA 2.6 – BANCO DE CAPACITORES *FUSELESS*
(CORTESIA DE SADEFEM)

2.4.4 Comparação entre os Tipos de Capacitores

Para melhor entendimento, os BCs podem ser dimensionados conforme o fluxograma da Figura 2.7.



Observações:

- 1) Fusíveis internos podem não interromper a tensão fase-neutro;
- 2) Recomendável adotar fusível por grupo;
- 3) É recomendada a detecção da falha;
- 4) Presumindo o uso de fusíveis tipo expulsão.

FIGURA 2.7 – FLUXOGRAMA DE INSTALAÇÃO DOS BCS VIA FUSÍVEIS (SADEFEM)

2.5 ESPECIFICAÇÕES PARA APLICAÇÕES DE BANCOS DE CAPACITORES EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Faz-se necessário uma abordagem das principais características mediante norma para capacitores da rede primária e secundária de distribuição de energia.

2.5.1 Características dos Capacitores da Rede Primária

A NBR 5282 – Capacitores de Potência em Derivação para Sistema de Tensão Nominal acima de 1000 V é a principal norma que rege as especificações dos capacitores da rede primária de distribuição no Brasil. A seguir, são descritos os critérios a respeito de níveis de tensão, altitude de instalação, temperatura, bucha e corrente máxima admitida.

- a) Tensão: a Tabela 2.2 especifica os níveis de tensões para regime de longa duração.

TABELA 2.2 – TENSÕES DE REGIME PERMANENTE DE LONGA DURAÇÃO PARA BCS DA REDE PRIMÁRIA (NBR 5282)

TIPO	TENSÃO (VALOR EFICAZ)	DURAÇÃO MÁXIMA	OBSERVAÇÕES
Frequência Nominal	$1,00 U_n$	Contínua	Ver nota 5
Frequência Nominal	$1,10 U_n$	12 horas p/ período de 24 horas	
Frequência Nominal	$1,15 U_n$	30 minutos p/ período de 24 horas	
Frequência Nominal	$1,20 U_n$	5 minutos	Ver nota 3
Frequência Nominal	$1,30 U_n$	1 minuto	Ver nota 3
Frequência Nominal mais harmônicos			Ver NBR 10671

Nota: 1 Para valores de tensão compreendidos entre $1,00 U_n$ e $1,10 U_n$ a duração de sobretensão devida, por exemplo, à queima de unidades deve ser limitada ao tempo necessário para a reposição das condições normais sem significativa deterioração.

Nota: 2 A amplitude de sobretensão que pode ser tolerada sem significativa deterioração do capacitor depende da sua duração do número total de sobretensão e da temperatura do capacitor.

Nota: 3 As sobretensões indicadas nesta tabela foram assumidas por valores superiores a $1,15 U_n$ que não ocorrem mais de 200 vezes durante a vida do capacitor.

Nota: 4 Os capacitores projetados conforme esta Norma podem operar até 12h por período de 24h com até 110% da tensão nominal, desde que a tensão de crista incluindo todos os harmônicos, não exceda $1,2 * \sqrt{2}$ vezes a tensão nominal, e a potência máxima não exceda 144% da potência nominal.

Nota: 5 U_n é escolhido como valor médio mais elevado durante um período qualquer de energização do capacitor, considerando-se o aumento da tensão provocado pela ligação do banco e o perfil de tensão no local de instalação (ver NBR 10671).

- b) Altitude: Os capacitores devem ser adequados para funcionar em altitudes até 1000 m.
- c) Bucha: Devem ser de material isolante resistente às intempéries soldadas diretamente ao tanque e posicionadas simetricamente na superfície da caixa e devem estar de acordo com a NBR 5034.
- d) Temperatura: Os capacitores são classificados em categorias de temperatura, especificada por um número seguido por uma letra. O número representa a menor temperatura ambiente na qual o capacitor pode operar. As letras representam os limites superiores das faixas de variação de temperatura sendo os valores indicados na Tabela 2.3:

TABELA 2.3 – TEMPERATURA DE OPERAÇÃO DOS BCS DO PRIMÁRIO (NBR 5282)

SÍMBOLO	TEMPERATURA AMBIENTE (°C)			
	MIN	MAX	MÉDIA MAIS ALTA EM UM PERÍODO DE	
			24h	1ano
A	-50	40	30	20
B	-40	45	35	25
C	-25	50	40	30
D	-5	55	45	35
	5			

- e) As unidades capacitivas devem ser capazes de suportar continuamente (observadas as condições de tensão da tabela de tensão) uma corrente de valor eficaz igual a 1,31 vezes a corrente nominal I_n , excluindo os transitórios. Em função do valor real da capacitância, a qual pode ser no máximo 1,10 vezes a capacitância nominal. A máxima corrente permissível pode alcançar $1,44 \cdot I_n$. Estes fatores de sobrecorrente são destinados a ter em conta efeitos combinados dos harmônicos e das sobretensões até 1,10 pu inclusive.

2.5.2 Características dos Capacitores da Rede Secundária

A IEC 60831-1 – Capacitores de Potência auto-regenerativo para sistemas CA, com tensão máxima de 1000 V, é a principal norma que rege as especificações dos capacitores da rede secundária de distribuição. A seguir, serão descritos os

critérios a respeito de níveis de tensão, altitude de instalação, temperatura, bucha e corrente máxima admitida.

- a) Tensão: A Tabela 2.4, especifica os níveis de tensões para regime de longa duração.

TABELA 2.4 – TENSÕES PARA REGIME DE LONGA DURAÇÃO DOS BCS DO SECUNDÁRIO
(IEC-60831-1)

TIPO	TENSÃO (VALOR EFICAZ)	DURAÇÃO MÁXIMA	OBSERVAÇÕES
Frequência Nominal	$1,00 U_n$	Contínua	
Frequência Nominal	$1,10 U_n$	8h a cada 24h	Flutuações da rede
Frequência Nominal	$1,15 U_n$	30 minutos a cada 24h	Flutuações da rede
Frequência Nominal	$1,20 U_n$	5 minutos	Aumento na tensão em condições de carga Ver item 29 Norma
Frequência Nominal	$1,30 U_n$	1 minuto	
Nota: 1 A amplitude da sobretensão que pode ser tolerada sem deterioração significativa do capacitor depende da sua duração, número de aplicações e temperatura do capacitor. Supõe-se que as sobretensões dadas na tabela 3 da norma e tendo um valor superior a $1,15 U_n$ ocorrem 200 vezes na vida de um capacitor. (Ver anexo A, A1.2)			

- b) Altitude: Não dever exceder 2000 m, devido a sua condição de dissipação de calor, salvo projetos especiais.
- c) Temperatura: Os capacitores são classificados em categorias de temperatura, especificada por um número seguido por uma letra. O número representa a menor temperatura ambiente na qual o capacitor pode operar. As letras representam os limites superiores das faixas de variação de temperatura sendo os valores indicados na Tabela 2.5.

TABELA 2.5 – TEMPERATURA DE OPERAÇÃO DOS BCS DO SECUNDÁRIO (IEC-60831-1)

SÍMBOLO	TEMPERATURA AMBIENTE (°C)			
	MIN	MAX	MÉDIA MAIS ALTA EM UM PERÍODO DE	
			24h	1ano
A	-50	40	30	20
B	-40	45	35	25
C	-25	50	40	30
D	-5	55	45	35
	5			

- d) **Máxima Corrente Admitida:** Os capacitores devem ser aptos a funcionar permanentemente com uma corrente de linha de valor eficaz de 1,3 vezes a corrente correspondente na tensão senoidal nominal a frequência nominal, exceção feita aos regimes transitórios. Tomando-se em conta a tolerância da capacitância de $1,15 \cdot C_N$ a corrente nominal pode alcançar 1,5 pu. Estes fatores de sobrecorrente são definidos considerando-se os efeitos combinados das sobretensões, harmônicas e tolerância de capacitância. Limites harmônicos devem ser estabelecidos entre fabricantes e clientes.

2.6 CONFIGURAÇÃO DA MONTAGEM

Segundo Coelba (2004), os BCs podem ser instalados tanto em locais cobertos quanto ao ar livre, em plataforma ou postes, desde que haja uma boa refrigeração, e deve haver espaço suficiente para permitir completa inspeção e manutenção.

Os BCs utilizados pelas concessionárias são formados por várias unidades monofásicas e sua conexão com o sistema elétrico pode ser das seguintes maneiras:

- Ligação em delta: é usada especialmente em classe de tensão até 2,4 kV. Para tensão superiores, torna-se anti-econômica, se comparada com as outras, devido ao elevado custo de proteção associada.

Esta ligação impede a circulação de correntes de 3ª harmônica, que ocorre na conexão estrela com neutro aterrado e que pode causar interferência nos circuitos de comunicação e proteção.

- b. Ligação em estrela com o neutro aterrado: este tipo de ligação fornece uma via de escoamento de baixa impedância para correntes de descarga atmosférica. Algumas vezes essa autoproteção é utilizada e o mesmo é operado sem proteção.

Como o neutro é fixo, neste tipo de ligação, a tensão de restabelecimento é menos severa. Este tipo de ligação oferece baixo custo de instalação e ocupa pouca área, no entanto, pode provocar interferência em circuitos de comunicação e proteção, devido a circulação de correntes de harmônicas de seqüência zero para a terra.

- c. Ligação em estrela com neutro isolado: este tipo de ligação não provoca interferência nos circuitos de comunicação, pois bloqueia a circulação de correntes harmônicas. Por outro lado deve-se dar atenção especial para tensões transitórias de restabelecimento nos equipamentos. Este fato pode encarecer os dispositivos de proteção.
- d. Ligação em dupla estrela não aterrada: dentre as características desta ligação, pode-se dizer que os distúrbios do sistema não se transmitem ao circuito de proteção do BC. Não há vias de escoamento para correntes harmônicas de seqüência zero e os esquemas de proteção possuem custos relativamente baixos, principalmente no que diz respeito ao relés.

A Tabela 2.6, mostra a aplicação na prática a montagem dos capacitores no sistema de distribuição.

TABELA 2.6 – MONTAGEM DOS BCS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO (SADEFEM)

APLICAÇÃO	MONTAGEM	LIGAÇÃO	POTÊNCIA (Mvar)
Distribuição	Poste	Y isol ou Y ater	0,0050; 0,00750; 0,0100; 0,0150, 0,020.
Distribuição	Subestação	Y isol ou Y-Y isol	1,20; 1,80; 2,40; 3,60; 4,80; 5,40, 6,0; 7,20; 9,60.
Sub- Transmissão	Subestação	Y-Y isol ou Y ater ou Y-Y ater	10,0; 15,0; 20,0; 25,0; 30,0; 40,0; 50,0; 60,0.
Transmissão	Subestação	Y ater ou Y-Y ater	50,0; 60,0; 100,0; 200.

2.7 CUIDADOS QUE ENVOLVEM A APLICAÇÃO DOS BANCOS DE CAPACITORES

Quando se opta pela instalação de capacitores deve-se ter em mente que se está agregando no sistema um novo equipamento. Este equipamento possui características ímpares e com isto pode se envolver e gerar algumas dificuldades extras para o sistema, tais como: ressonância, correntes de *inrush* e desenergização.

2.7.1 Efeitos dos Capacitores em Circuitos com Harmônicos

Pelas considerações estabelecidas nas normas mundialmente reconhecidas de especificação de capacitores de potência, existem restrições quanto à utilização dos mesmos em circuitos com condições anormais de operação (transitórios, sobretensões, harmônicos, etc.).

Tais restrições são decorrentes do fato de que o fabricante, ao projetar um determinado tipo de capacitor, leva em consideração os valores normais de tensão e corrente a que o mesmo estará submetido (valores nominais), não podendo prever de modo generalizado possíveis condições adversas. Tais condições adversas, em

muitos casos, ultrapassam os valores normalizados de suportabilidade do equipamento, sacrificando desta forma sua vida operacional.

Todo circuito que opera com dispositivos que alteram a forma de onda da corrente e da tensão fundamental de alimentação, possui componentes harmônicos. A amplitude e freqüência destes harmônicos dependem do tipo de equipamento utilizado, de sua potência e dos valores intrínsecos do circuito e equipamento a ele conectado.

A impedância de qualquer tipo de capacitor (reatância capacitiva) é definida pela seguinte expressão:

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (2.3)$$

onde: X_c : Impedância capacitiva em ohm;

ω : Freqüência angular da rede em radianos;

f : Freqüência da rede em Hz;

C : Capacitância em farad.

Desta forma pode-se concluir que a impedância dos mesmos será tanto menor quanto maior for a freqüência da rede, uma vez que tal impedância é inversamente proporcional à freqüência.

Tal efeito faz do capacitor um “caminho” de baixa impedância para a circulação de harmônicos, fazendo com que uma grande parte das correntes harmônicas geradas passe pelo capacitor.

Cabe salientar que os capacitores “não geram” harmônicas, e sim são vítimas de seus efeitos. Observa-se também que determinados circuitos podem ter seus valores de harmônicas aumentados em intensidade após a instalação de capacitores nos mesmos, uma vez que estes tendem a diminuir a impedância geral do circuito para freqüência acima da fundamental.

2.7.1.1 Ressonância Série

Com relação à circulação de componentes harmônicos sobre os capacitores, vale salientar que a condição mais severa ocorre quando for estabelecida uma sintonia em série entre os valores da impedância equivalente do sistema com o capacitor (ressonância série). Neste caso, a atenuação da amplitude do harmônico

considerado é praticamente nenhuma, transferindo para o capacitor toda (ou quase toda) a energia correspondente à harmônica sintonizada.

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (2.4)$$

onde: f_r : frequência de Ressonância em Hz;

L : Indutância em henry

C : Capacitância em farad.

É comum, entretanto, a utilização do efeito de ressonância em questão para a “filtragem” das harmônicas existentes em sistemas elétricos. Cria-se desta forma o conceito de “Filtro de Harmônicas”, onde se força a ocorrência do efeito acima descrito (ressonância série) para a limpeza do sistema elétrico. Logicamente, o equipamento utilizado para tal proposição é dimensionado para suportar as adversidades de funcionamento (sobrecorrente e sobretensões harmônicas), sendo aproveitada a sua potência de serviço na tensão fundamental para correção do fator de potência no ponto de instalação do mesmo.

2.7.1.2 Ressonância Paralela

A esta ressonância apresenta um elevado valor de impedância, pela combinação em paralelo da reatância capacitiva com a reatância indutiva, nas frequências onde ambas equivalem. Isto pode representar um sério problema quando esta impedância for percorrida por uma corrente, mesmo que pequena, de mesma frequência, fazendo com que se elevem drasticamente as tensões em seus terminais e as correntes harmônicas desta ordem existentes no sistema, levando a danos aos equipamentos do sistema, principalmente aos BCs instalados no ponto de ocorrência de tal ressonância.

Nos sistemas de potência, a utilização de capacitores para correção de fator de potência pode caracterizar uma ressonância paralela no ponto de instalação às frequências harmônicas que estejam presentes no sistema.

Desta forma, em sistemas onde existe cargas geradoras de harmônicas significativas, é imprescindível a realização de estudos harmônicos para garantir a instalação segura dos BCs para a correção do fator de potência, evitando com isto danos a estes bancos e ao próprio sistema.

Para determinação da frequência de ressonância quando da instalação de bancos de capacitores, utiliza-se a seguinte equação Natarajan (2005):

$$N = \sqrt{\frac{kV_{Acc}}{kvar}} \quad (2.5)$$

onde: N: Ordem Harmônica de Ressonância;

kV_{Acc}: Potência de curto-circuito no ponto de instalação do banco de capacitores kVA;

kvar: Potência do banco de capacitores em kvar.

2.7.2 Corrente de *Inrush*

A energização de um BCs automáticos implica sempre no aparecimento de uma corrente transitória denominada corrente *inrush*. O valor máximo, bem como a frequência dessa corrente, depende da tensão aplicada, da reatância do circuito (capacitância e indutância), da carga armazenada no capacitor a ser energizado e do amortecimento provocado pela existência de resistores de pré-inserção e/ou outras resistências do circuito (BEÊ, 2007).

Quando já existem capacitores ligados na rede, a corrente *inrush* apresenta valores mais elevados (IEEE, 1973). As fórmulas para o cálculo dessas correntes *inrush* para as diversas configurações dos bancos foram obtidas de IEEE Std 342-1973 / ANSI C. 37.0731-1973 (1973) e são apresentadas a seguir.

a) Energização de um Banco Isolado

$$I_{inrush} = 1,41\sqrt{I_3 \cdot I_k} \quad (2.6)$$

onde: I_{inrush} : Corrente *Inrush* em ampéres;

$$I_k = 1,15 \cdot I_c;$$

I_c : Corrente nominal do banco de capacitores em ampéres;

I_3 : Corrente de curto-circuito trifásico no ponto de instalação do banco de capacitores em ampéres.

b) Energização de um Banco com Outro Ligado no Mesmo Circuito

$$I_{inrush} = 1747 \sqrt{\frac{V_{ff} \cdot I_{k1} \cdot I_{k2}}{L_{eq}(I_{k1} \cdot I_{k2})}} \quad (2.7)$$

onde: I_{inrush} : Corrente *Inrush* em ampéres;

$$I_{k1} : 1,15 \cdot I_{c1};$$

$$I_{k2} : 1,15 \cdot I_{c2};$$

I_{c1} e I_{c2} : Correntes nominais dos bancos de capacitores 1 e 2, em ampéres;

V_{ff} : Tensão fase-fase, [V];

L_{eq} : Indutância total equivalente por fase entre bancos de capacitores, [μ H].

c) Energização de um Banco de Igual Potência Ligado no Mesmo Circuito

$$I_{inrush} = 1235 \sqrt{\frac{V_{ff} \cdot I_k}{L_{eq}}} \quad (2.8)$$

onde: I_{inrush} : Corrente *Inrush* em ampéres;

$$I_k : 1,15 \cdot I_{c1};$$

I_{c1} : Corrente nominal do banco de capacitor, em ampéres;

V_{ff} : Tensão fase-fase, [V];

L_{eq} : Indutância total equivalente por fase entre bancos de capacitores, [μ H].

2.7.3 Desenergização dos Bancos de Capacitores

A deserenergização de BCs pode ocasionar um fenômeno chamado de *restrike*. Este fenômeno consiste no religamento do disjuntor dos BCs de forma involuntária. A tensão transitória de restabelecimento após a abertura do disjuntor favorece a reação do BCs, pois capacitores tendem a manter tensão. Os efeitos proporcionados por este fenômeno podem ser bem severos para o sistema. Segundo Natarajan (2005) pode se ter 2,2 pu de sobretensão no circuito do capacitor, 3,2 pu em cada fase e 6,4 pu de tensão transitória de restabelecimento. A Figura 2.8, mostra o *restrike* em uma única fase.

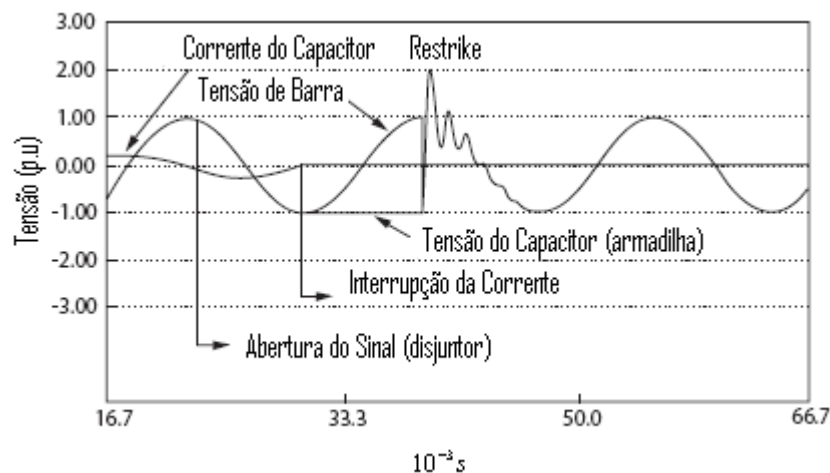


FIGURA 2.8 – RESTRIKE (NATARAJAN)

2.8 METODOLOGIA USADA PELAS CONCESSIONÁRIAS PARA ALOCAÇÃO DE BCs NA REDE PRIMÁRIA DE DISTRIBUIÇÃO

Segundo COPEL (1992), para se obter melhores resultados, os BCs devem ser instalados próximos das cargas de maior porte, onde eles produzam a maior redução das perdas, proporcionando um melhor perfil de tensão. Quando isto não é possível uma das opções a seguir deve ser contemplada:

- Para cargas uniformes distribuídas, os BCs podem ser localizados a dois terços da distância da subestação;
- Para cargas com diminuição e distribuição uniformes, os BCs podem ser localizados a meia distância da subestação;
- Para maior elevação da tensão, os BCs devem ser próximos às cargas de maior porte.

Usualmente os BCs são instalados nos locais onde o fator de potência é mínimo e este valor é obtido através da medição de tensão, corrente, potência ativa, reativa e aparente no alimentador para definir as condições de carga máxima e carga mínima. Os picos e vales em uma curva de demanda de potência reativa fazem com que seja difícil apenas um simples BC corrigir o fator de potência para um valor desejado. Se o fator de potência desejado é obtido durante o horário de pico de carga, durante a condição fora de pico pode resultar em uma condição de excesso de compensação de reativo no sistema. Este excesso de compensação de reativo pode causar perdas no sistema similares à condição onde o fator de potência

é baixo e indutivo. Outro problema que pode ser causado é a sobretensão do sistema. Para evitar que isto ocorra deve-se utilizar sempre que possível BCs automáticos ao invés de fixos.

Os BCs devem localizar-se ao longo do alimentador de forma a induzir o fluxo de reativo ao longo do sistema (COPEL, 1992). Uma vez conhecido o perfil de fluxo de reativo do alimentador e a potência dos bancos a serem utilizados, a sua localização é feita do fim para o início do alimentador e nos pontos onde a potência reativa é aproximadamente metade da potência do BC a ser instalado, levando-se em conta a compensação dos BCs já instalados.

Segundo as regras práticas, observa-se na Figura 2.9 que a instalação de BC de 600 kvar no alimentador, que inicialmente está sem capacitores, deve ser feita no penúltimo nó (enumerado da esquerda para a direita), pois o fluxo de reativo circulante nessa última porção do circuito é a metade do valor do capacitor. Na seqüência, a instalação de um segundo BC de 600 kvar, considerando o fluxo remanescente provocado pela instalação do primeiro capacitor, é feita na antepenúltima barra do alimentador, o qual restabelece um fluxo de reativo vindo da subestação 600 kvar menor. Seguindo o mesmo raciocínio, instala-se o terceiro capacitor na barra anterior a antepenúltima barra desse alimentador.

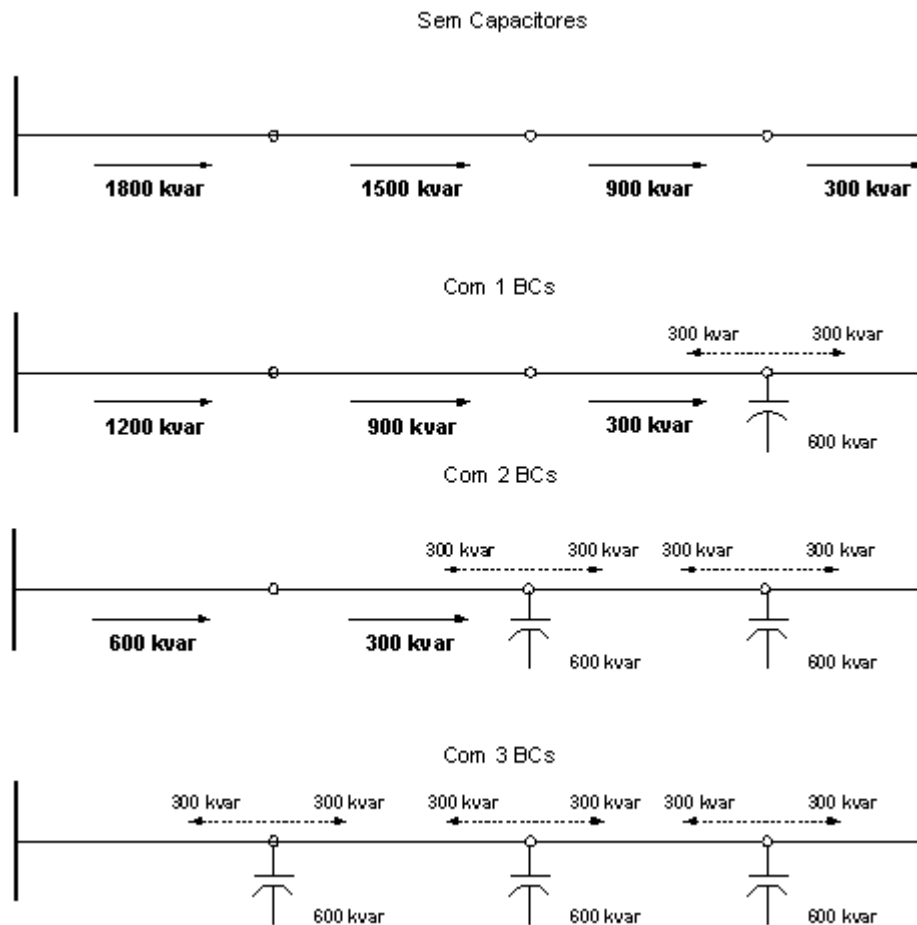


FIGURA 2.9 – PERFIL DO REATIVO DO ALIMENTADOR

Os BCs são dimensionados de acordo com a potência reativa que se deseja compensar, tornando assim o fator de potência próximo de 1,0. Caso seja necessário, poderam ser feitas medições de potência reativa no ponto de instalação do banco.

Em alimentadores de subestação de distribuição 69 kV, a potência do BC é dimensionada pela curva de carga do alimentador. Já em alimentadores de subestação de transmissão 34,5/138 kV sem operador permanente, o dimensionamento do banco é estimado por método indireto, através do cálculo do fluxo de potência.

A seguir são apresentados alguns procedimentos que são tomados para a instalação de capacitores em alimentadores de distribuição.

1. Manter um fator de potência mínimo de 0,95 durante o período de carga média e pesada, na saída do alimentador.

2. A máxima compensação resultante deverá ser limitada pelo fator de potência igual a 1,0 no início do alimentador em carga máxima, admitindo-se em determinados períodos o fator de potência levemente adiantados, desde que não ocorram sobretensões do alimentador.
3. Instalar os BCs no tronco do alimentador.
4. Localizar os BCs próximos a grandes consumidores industriais.
5. Em alimentadores com carga residencial, comercial e grandes consumidores industriais localizar os bancos no centro de carga de uma área do alimentador.
6. Não instalar BCs em ramais protegidos por chaves fusíveis, pois em caso de abertura involuntária em uma das fases no lado da fonte, provocar-se-á a energização da fase aberta através dos capacitores conectados em estrela isolada.
7. Instalar os BCs a uma distância mínima de 1,0 km da subestação, ou a uma distância que minimize os efeitos da corrente de *inrush*.
8. Os BCs fixos devem ser dimensionados para a compensação de reativos em carga leve e os automáticos em carga média e pesada.
9. Analisar cuidadosamente se a elevação de tensão devido a instalação do banco não provocará sobretensão no consumidor, isto, tanto na configuração normal como de emergência do alimentador.

Dentre esses procedimentos, apenas alguns foram considerados na formulação do problema utilizado nesta dissertação. São eles: (i) opção pela instalação dos capacitores no tronco do alimentador ou em todas as barras do alimentador; e, (ii) alocação de capacitores fixos para compensação de reativos em carga leve/média/pesada e dos automáticos para carga pesada e média.

2.9 OPERAÇÃO DOS CAPACITORES AUTOMÁTICOS

A solicitação de potência reativa é variável ao longo do dia e a entrada de capacitores em operação causa elevação na tensão que pode ser demasiada, principalmente em períodos de carga leve. Como também é inviável a colocação e retirada do equipamento por operação manual diretamente, os BCs são acoplados a

controles automáticos, que comandam as operações de ligar e desligar os bancos, conforme o dispositivo sensor do controle.

Dentre estes dispositivos, o mais utilizado é o sensor de tempo e tensão, ou seja, opera em função do nível de tensão e das horas do dia. Porém, existem outros dispositivos, como o sensor apenas de tensão e como o sensor de corrente.

A função do controle se restringe basicamente à colocação e a retirada do BCs em operação. Para tanto possui um dispositivo sensor (corrente, tensão ou tempo/tensão) ajustável, para comandar chaves a óleo automáticas que ligam ou desligam os BCs.

Normalmente existe necessidade maior da compensação reativa no sistema em horários de carga pesada e média. Os sensores são então usualmente ajustados para que coloquem em operação os capacitores nestes períodos de carga, e os mantenham fora de operação nos outros períodos como nos períodos de carga leve, onde os bancos comumente utilizados são bancos fixos.

2.9.1 Controle com Sensor de Tempo e Tensão

Este controle é alimentado em baixa tensão por um transformador de potencial (TP) com relação de 120:1 o que significa que quando a tensão for a nominal (13,8 kV), a tensão secundária deste TP é de 115V.

Possui então um sensor de tensão que compara a tensão secundária deste TP com as tensões ajustadas para comandar as operações de colocar e retirar do sistema o banco de capacitor. Além do dispositivo de tensão, possui ainda um dispositivo de tempo, que modifica o valor da tensão secundária do TP, simulando uma queda de tensão através de um resistor em horários programados, forçando a entrada do banco em operação.

O ajuste das tensões pode ser efetuado de duas maneiras, dependendo do tipo de equipamento. Em alguns, ajusta-se uma tensão associada a uma banda (B), o que determina uma faixa. Em outros, ajusta-se uma tensão para ligar (V_{on}) e outra para desligar (V_{off}), bem como um valor de compensação da tensão (V_c) para o horário de funcionamento do dispositivo de tempo, conforme Figura 2.10.

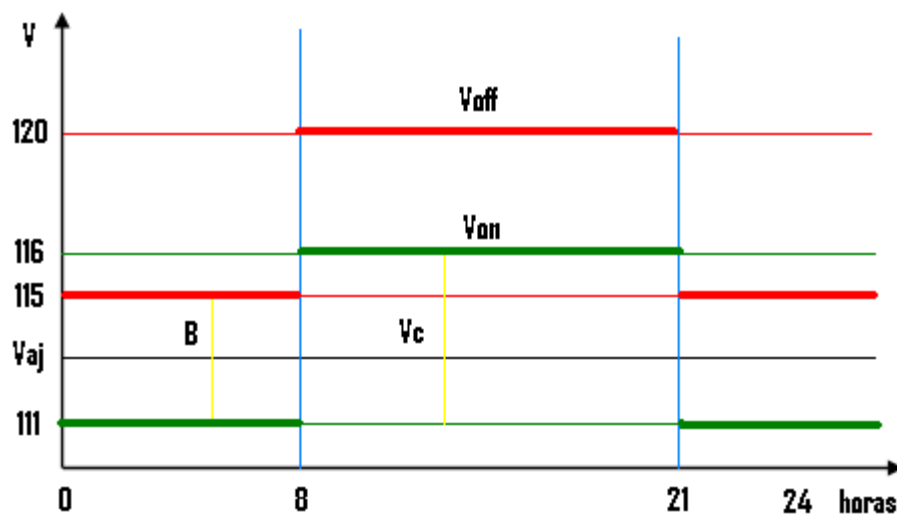


FIGURA 2.10 – CURVA DE OPERAÇÃO DO SENSOR TEMPO-TENSÃO

O dispositivo de tempo é composto por um relógio que marca as horas do dia e os dias da semana. Ajusta-se então um intervalo de horário durante determinados dias da semana em que o dispositivo atuar. A sua atuação consiste na abertura de uma chave, que normalmente curto-circuita um reostato, Figura 2.11. Desta forma, quando a chave é aberta, o reostato é inserido no circuito do sensor tensão, simulando então uma queda de tensão no secundário do TP. Deve-se então ajustar as horas e os dias da semana em que se pretende inserir o reostato, e o valor da queda de tensão adicional desejado.

Existe ainda um ajuste de retardo, que nada mais é do que um temporizador que retarda a operação. A finalidade deste temporizador é evitar um número excessivo de operações devido a flutuações de tensão e para coordenação com outros equipamentos.

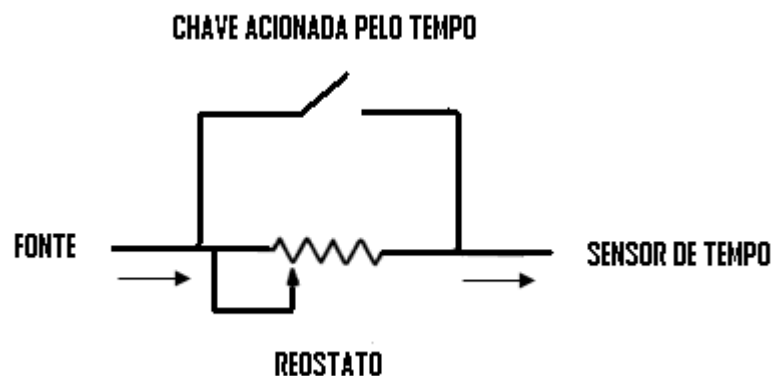


FIGURA 2.11 – DISPOSITIVO DE TEMPO

2.9.2 Elevação Causada pela Instalação dos BCs

Para o cálculo dos ajustes é necessário primeiramente verificar se o BC não causará tensão elevada no circuito. Assim é necessário calcular:

- Queda de tensão máxima e mínima entre a subestação fonte e o ponto de instalação do BC;
- Elevação de tensão provocada pela operação do BC (variação de tensão do capacitor);

A elevação de tensão, em V, provocada pelo BC é proporcional a sua potência e à reatância indutiva total entre a subestação – fonte do circuito e o ponto onde está localizado o BC. O valor deste acréscimo de tensão pode ser calculado pela seguinte equação:

$$\Delta V_{cap} = \frac{Q_c \cdot X_t}{V_n} \quad (2.9)$$

onde: ΔV_{cap} : elevação de tensão provocada pelo BC;

Q_c : potência total do BC, em kvar;

X_t : reatância total entre o BC e a subestação – fonte, em Ω ;

V_n : tensão nominal do circuito, em kV.

2.9.3 Ajuste da Tensão

A tensão de ajuste, em V, é definida como o valor resultante da equação abaixo:

$$V_{aj} = \frac{V_{on} + V_{off}}{2 \cdot RTP} \quad (2.10)$$

onde: V_{aj} : tensão ajustada, em V;

V_{on} : tensão de referência para ligar o BC, em V;

V_{off} : tensão de referência para desligar o BC;

RTP : relação de transformação do TP que alimenta o controle (normalmente igual a 120).

Em alguns controles existe um botão para ajustar V_{off} e outro para ajustar V_{on} . Em outros, existe um botão para ajustar V_{aj} e outro para ajustar a banda (B).

A banda (B) é a diferença entre tensões de referência V_{off} e V_{on} do BC, referida a baixa tensão. Deve ser definida de modo que a elevação de tensão provocada pela entrada em operação do BC não ultrapasse o valor máximo de tensão ajustado e conseqüentemente provoque a saída do banco de operação novamente, ou seja, $B > \Delta V_{cap}$. O cálculo da banda é feito pela seguinte equação:

$$B = \frac{V_{on} + V_{off}}{RTP} \quad (2.11)$$

Nos capacitores com sensor de tempo, deve ser ajustado o reostato que é inserido no circuito sensor de tensão para simular um adicional nível de tensão, modificando o valor da tensão em determinados horários programados.

O cálculo deste ajuste deve levar em consideração então os valores de tensão nos horários em que se deseja que o mesmo entre em operação e nos que permaneça fora de operação. A rigor existem dois ajustes, sendo um normal, e outro acrescido de uma constante (V_c). O dispositivo de tempo comanda então a abertura e o fechamento da chave que “*by-passa*” o reostato. Deve-se ajustar o reostato de forma que, quando for inserido, o nível de tensão ajustado para ligar o BC fique acima da tensão simulada no momento, o que levará o controle a comandar a entrada em operação do banco e, quando a chave estiver na posição de “*by-pass*” do reostato, o nível de tensão ajustado para desligar o BC fique abaixo da tensão no momento, o que levará o controle a comandar a saída de operação do equipamento.

2.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo de um modo geral resume as principais características dos BCs da rede primária e secundária de distribuição de energia, embora não tenha sido considerado todas as características ou fenômenos que envolvam os capacitores. Além disso foram expostos os critérios e metodologias usadas pelas concessionárias de energia (COPEL 1992) e regras práticas de instalação dos mesmos (COPEL 1996^a).

Destaca-se também que não existem regras práticas de alocação de bancos de capacitores em redes secundárias, pois não é prática das empresas de distribuição nacionais utilizarem esse tipo de equipamento nos seus circuitos secundários.

Outro ponto importante é que esse trabalho não aborda o uso de BCs automáticos nos circuitos secundários de distribuição, uma vez que seu custo seria um impeditivo para sua aplicação.

3 ALGORITMOS GENÉTICOS

3.1 INTRODUÇÃO

Algoritmos Genéticos (AGs) são programas evolutivos inspirados na Teoria de Seleção Natural. Eles atuam sobre uma população de indivíduos baseados no fato de que os indivíduos com boas características genéticas têm maiores chances de sobrevivência e de produzirem descendentes cada vez mais aptos, enquanto os indivíduos menos aptos tendem a desaparecer.

Eles trabalham sempre com as áreas mais promissoras do espaço de busca (GALVÃO e VALENÇA, 1999) e (HAUPT e HAUPT, 1998), utilizando para isso, uma classe de procedimentos que compreendem um conjunto de passos distintos e bem especificados, na qual cada um destes passos possui muitas variações possíveis. Assim, para cada indivíduo da população atual, chamado cromossomo, é aplicado um mecanismo de reprodução, baseado em processo evolutivo com o objetivo de explorar o espaço de busca e encontrar melhores soluções para o problema (RABELO e OCHI, 1996).

Nessa tarefa de busca ou otimização são consideradas todas as possibilidades de solução de um determinado problema, e a função de avaliação ou função de custo é uma maneira de avaliar as soluções no espaço de busca. Existem muitos métodos de busca e funções de avaliação (GOLDBERG, 1997).

Os AGs diferem dos métodos tradicionais de otimização, principalmente em quatro aspectos (GOLDBERG, 1997) e (REZENDE, 2003):

1. Trabalham com uma codificação do conjunto de parâmetros e não com os próprios parâmetros;
2. Trabalham com um espaço de busca, onde estão todas as possíveis soluções do problema e não um único ponto;
3. Utilizam informação de custo ou recompensa e não derivadas ou outro conhecimento auxiliar;
4. Utilizam regras de transição probabilísticas e não determinísticas.

Os AGs são muito eficientes para busca de soluções ótimas, ou aproximadamente ótimas, em uma grande variedade de problemas, pois não impõem muitas das limitações encontradas nos métodos de busca tradicionais. Baseiam-se na evolução biológica e são capazes de identificar e explorar fatores ambientais e convergir para soluções ótimas em níveis globais, contornando a ocorrência de ótimos locais. Além de seguir uma estratégia de gerar e testar soluções, são capazes de identificar e explorar aspectos do ambiente onde o problema está inserido e convergir globalmente para soluções ótimas ou aproximadamente ótimas (GOLDBERG, 1997) e (HOLLAND, 1992).

Em síntese, eles baseiam-se inicialmente na geração de uma população formada por um conjunto aleatório de indivíduos que podem ser vistos como possíveis soluções do problema. Durante o processo evolutivo, esta população é avaliada: para cada indivíduo é dado um índice, refletindo sua habilidade de adaptação a determinado ambiente. Uma porcentagem dos mais adaptados é mantida, enquanto os outros são descartados. Os membros mantidos pela seleção podem sofrer modificações em suas características, através de mutações e recombinação, gerando descendentes para a próxima geração. Este processo, chamado de reprodução, é repetido até que um conjunto de soluções satisfatórias seja encontrado, conforme apresentado no Algoritmo 1.

Algoritmo 1: Algoritmo Genético típico

Seja $S(t)$ a população de indivíduos na geração t .

$t \leftarrow 0$

inicializa $S(t)$

avaliar $S(t)$

enquanto o critério de parada não for satisfeito faça:

$t \leftarrow t+1$

selecionar $S(t)$ a partir de $S(t-1)$

aplicar recombinação sobre $S(t)$

aplicar mutação sobre $S(t)$

avaliar $S(t)$

Fim enquanto

Embora possam parecer simplistas do ponto de vista biológico, esses algoritmos são suficientemente complexos para fornecer mecanismos poderosos e robustos de busca adaptativa (COELHO, 2003) e (GOLDBERG, 1997).

Vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos com aplicação de técnicas de Algoritmos Genéticos, as quais são extremamente interessantes como ferramentas de busca e otimização na solução dos mais diferentes tipos de problemas (BEASLEY, BULL e MARTIN, 1992), (BEASLEY, BULL e MARTIN, 1993), (WHITLEY, 1993) e (REZENDE, 2003).

3.2 TERMINOLOGIA

Baseado na teoria da evolução pode-se dizer que o meio ambiente é o responsável pela seleção em cada geração dos seres vivos mais aptos de uma população. Logo, somente os mais aptos conseguem passar suas características genéticas para as demais gerações, pois os menos adaptados são eliminados antes de gerarem descendentes. No processo de reprodução são aplicados os operadores genéticos de mutação e cruzamento, entre outros, que atuam sobre o material genético armazenado nos cromossomos e, com isso, tem-se a variabilidade dos indivíduos na população. A sobrevivência do mais adaptado é determinada pela seleção natural.

Os Algoritmos Genéticos sofrem grande influência da biologia, em suas definições, isso explica muitos termos semelhantes, utilizados por este método (DE OLIVEIRA GALVÃO e VALENÇA, 1999).

A seguir serão apresentados alguns termos comumente encontrados na literatura:

- Cromossomo: segmento do filamento cromático que se destaca por ocasião da divisão celular indireta, constituindo unidades definidas na formação do novo ser. Nos AGs este representa a estrutura de dados que codifica uma solução para um problema, ou seja, um indivíduo no espaço de busca.
- Gene: partícula do cromossomo em que se encerram os caracteres hereditários. Nos AGs, é um parâmetro codificado no cromossomo, ou seja, um elemento do vetor que representa o indivíduo.

- Genótipo: constituição hereditária de um indivíduo. Nos AGs, representa a informação contida no indivíduo.
- Fenótipo: diz-se dos indivíduos de um grupo que apresentam caracteres exteriores iguais, mas que diferem pelo seu genótipo. Nos AGs, representa o objeto, estrutura ou organismo construído a partir das informações do genótipo, ou seja, a decodificação do indivíduo.

Na próxima seção, serão abordados alguns operadores genéticos tradicionais, comumente utilizados na literatura.

3.3 CARACTERÍSTICAS GERAIS E REPRESENTAÇÃO

A aplicação de operadores genéticos tem como objetivo a produção de novos indivíduos a partir de indivíduos existentes. O princípio básico dos operadores é fazer com que a população, através de sucessivas gerações, estenda a busca até chegar a um resultado satisfatório. A grande utilidade destes operadores é fazer com que a população se diversifique e mantenha características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores.

Quando se trabalha com AGs para resolução de problemas, o grande desafio está exatamente na codificação, ou qual a melhor maneira de representar o problema, que deve ter uma estrutura de dados, geralmente vetores ou cadeias de valores binários (estruturas mais tradicionais, porém nem sempre as mais indicadas), reais ou inteiros. Esta estrutura é chamada de indivíduo ou cromossomo, e cada bit chamado de gene.

O indivíduo representa o conjunto de parâmetros de variáveis da função objetivo cuja resposta será maximizada ou minimizada. O conjunto de todas as configurações que o indivíduo pode assumir forma o espaço de busca. Por exemplo, se o indivíduo representa n parâmetros de uma função, então o espaço de busca é um espaço com n dimensões. A maioria das representações genotípicas, utiliza vetores de tamanho finito com um alfabeto também finito (REZENDE, 2003).

Normalmente, o genótipo de um indivíduo é representado por um vetor binário, onde cada elemento do vetor denota uma ou outra característica de uma determinada propriedade. Os elementos podem ser combinados formando as características reais do indivíduo, ou seja, o seu fenótipo. Portanto, essa

representação é independente do problema, pois uma vez encontrada a representação em vetores binários, as operações padrões podem ser utilizadas, facilitando o seu emprego em diferentes classes de problemas (SPEARS *et al.*, 1993).

A representação binária é historicamente importante, uma vez que foi utilizada nos trabalhos pioneiros de John Holland. Além disso, ela ainda é a representação mais utilizada, por ser de fácil utilização, manipulação e simplicidade de analisar teoricamente. Contudo, se um problema tem parâmetros contínuos e o usuário desejar trabalhar com maior precisão, provavelmente acabará utilizando longos indivíduos para representar soluções, necessitando de uma grande quantidade de memória. Outro aspecto a ser observado é a não-uniformidade dos operadores; por exemplo, se o valor real de um gene for codificado por um vetor binário, a mutação nos primeiros valores binários do gene afetará mais a aptidão do indivíduo que a mutação nos seus últimos valores (REZENDE, 2003).

A aptidão do indivíduo depende do seu desempenho e é calculada através da função de avaliação. Em problemas de otimização, a função objetivo é, ela mesma, a candidata natural ao cargo de função de avaliação ou função de aptidão. Assim, pode-se dizer que a função de avaliação é dependente do problema em particular. Esta função recebe como entrada o indivíduo e faz o cálculo da aptidão, ou grau de adaptação, retornando esta informação.

Uma comparação entre terminologia biológica, terminologia computacional e terminologia de otimização de reativo a ser utilizada nos Algoritmos Genéticos é apresentada na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 – TERMINOLOGIA

Biologia	Computação	Otimização de reativos
Cromossomo	Representa um candidato à solução, ou seja, um ponto no espaço de busca.	Representa conjunto de informações úteis para otimizar a quantidade de reativo na rede.
Gene	É um parâmetro codificado no cromossomo (um único bit, ou um bloco de bits).	É a localização e determinação do tamanho do banco de capacitor a ser instalado em um determinado alimentador no período de planejamento.
Recombinação	Troca de material genético entre cromossomos.	Troca de informações entre os cromossomos.
Mutação	Troca aleatória de um determinado gene do cromossomo.	Instalação ou não de um determinado banco de capacitores.
Genótipo	Configuração de genes no cromossomo de um indivíduo.	Codificação das informações do indivíduo para a rede da concessionária.
Fenótipo	Decodificação de um ou mais cromossomos.	Decodificação dos indivíduos em um determinado período de planejamento.

3.4 SELEÇÃO

Nos AGs é aplicado um critério de seleção para que o conjunto inicial de indivíduos gere descendentes mais aptos. Quando não existe nenhum conhecimento prévio sobre a região do espaço de busca onde se encontra a solução do problema na população inicial, os indivíduos são gerados aleatoriamente. Se houver um conhecimento prévio sobre a região em que está localizada a solução, ou seja, se forem conhecidas soluções aceitáveis que podem estar próximas à(s) solução(ões) ótima(s), os cromossomos iniciais podem ser definidos de forma determinada.

Com intuito de privilegiar os indivíduos mais aptos no processo de seleção, a cada membro da população é atribuído um valor dado por uma função f_{apt} , denominada função objetivo. Esta função recebe como entrada os valores do gene do indivíduo e fornece como resultado sua aptidão. A aptidão pode ser vista como uma nota que mede o quão boa é a solução codificada por um indivíduo e é baseada no valor da função objetivo, que é específica para cada problema.

Para alguns métodos de seleção, é desejável que o valor de aptidão de cada indivíduo seja menor que 1, e que a soma de todos os valores de aptidão seja igual a 1 ($f_{apt} < 1$ e $\Sigma(f_{apt} = 1)$). Para isso, para cada indivíduo é calculada a aptidão relativa (f_{rel}). A aptidão relativa para um dado indivíduo é obtida dividindo o valor de sua aptidão pela soma dos valores de aptidão de todos os indivíduos da população.

A função objetivo, também conhecida por função de avaliação ou função de custo, é geralmente uma expressão matemática que mede o quanto uma solução está próxima ou distante da solução desejada (satisfaz o objetivo do problema). Muitas vezes ela inclui restrições que devem ser satisfeitas pela solução.

No processo de seleção, após associada uma nota de aptidão a cada indivíduo da população, escolhe-se então um subconjunto de indivíduos da população atual, gerando uma população intermediária. Vários métodos de seleção têm sido propostos, entre eles se destacam tradicionalmente: Método da Roleta, Método do Torneio e o Método da Amostragem Universal Estocástica (REZENDE, 2003) e (COELHO, 2003).

3.5 OPERADORES GENÉTICOS

Dada uma população, para que seja possível gerar populações sucessivas que, espera-se, melhorem sua aptidão com o tempo, é necessária a aplicação de operadores genéticos. Estes operadores são: recombinação ou cruzamento e mutação. Eles são utilizados para assegurar que a nova geração seja renovada, mas possua de alguma forma, características de seus pais; e são úteis para que a população se diversifique e mantenha características de adaptação adquirida pelas gerações anteriores. Para prevenir que os melhores indivíduos não desapareçam da população pela manipulação dos operadores genéticos, eles podem ser colocados automaticamente na próxima geração por meio de uma política elitista. O princípio básico dos operadores genéticos é, então, transformar a população por meio de sucessivas gerações, estendendo a busca até chegar a um resultado satisfatório.

O operador de mutação é necessário para a introdução e manutenção da diversidade genética da população, alterando arbitrariamente um ou mais componentes de uma estrutura escolhida, o que fornece meios para introdução de novos elementos na população. Desta maneira, a mutação assegura que a

probabilidade de chegar a qualquer ponto do espaço de busca nunca será zero, além de contornar o problema de mínimos locais, pois este mecanismo altera levemente a direção da busca. O operador de mutação é aplicado aos indivíduos com uma probabilidade dada pela taxa de mutação ($0,001 \leq P_m \leq 0,1$); geralmente se utiliza uma taxa de mutação pequena, pois é um operador genético secundário. Uma baixa taxa de mutação previne que a busca fique estagnada em sub-regiões do espaço de busca. Além disso, possibilita que qualquer ponto do espaço de busca seja atingido. Com uma taxa muito alta a busca se torna essencialmente aleatória. Um exemplo de como ocorre a mutação é mostrado na Figura 3.1.

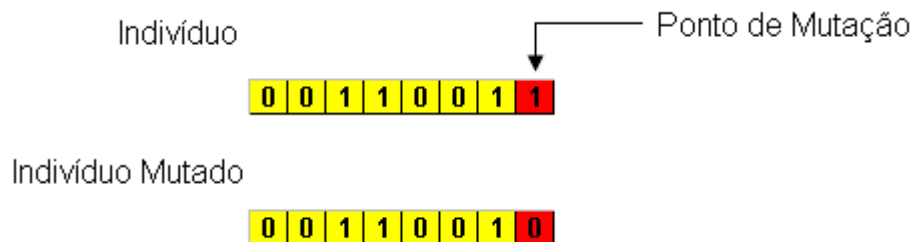


FIGURA 3.1 – EXEMPLO DE MUTAÇÃO

O cruzamento é o operador responsável pela recombinação de características dos pais durante o processo reprodutivo, permitindo que as próximas gerações herdem essas características. Ele é considerado o operador genético predominante, por isso é aplicado com probabilidade dada pela taxa de cruzamento ($0,6 \leq P_c \leq 0,99$), sendo maior que a taxa de mutação. Quanto maior for essa taxa, mais rapidamente novas estruturas são introduzidas na população. Mas se for muito alta, estruturas com boas aptidões poderão ser retiradas mais rapidamente que a capacidade da seleção em criar melhores estruturas. Se a taxa for muito baixa, a busca pode estagnar.

Os operadores genéticos citados anteriormente, podem ser utilizados de várias maneiras. Os mais tradicionais são:

Cruzamento de Um-ponto: um ponto de cruzamento é escolhido. A partir deste ponto, as informações genéticas dos pais serão trocadas. As informações anteriores a este ponto em um dos pais são ligadas às informações posteriores a este ponto no outro pai, como mostrado na Figura 3.2.

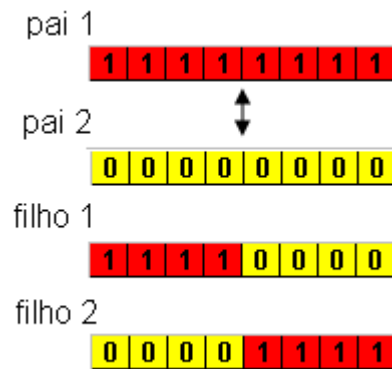


FIGURA 3.2 – EXEMPLO DE CRUZAMENTO DE UM PONTO

Cruzamento de Dois-pontos ou Multipontos: no cruzamento de 2 pontos, ou multipontos, é realizada a troca de material genético através de mais de um ponto previamente definidos, como apresentado na Figura 3.3. É uma generalização da idéia de troca de material genético através de pontos, em que vários pontos de cruzamento podem ser utilizados.

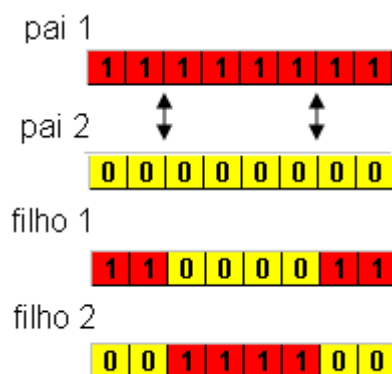


FIGURA 3.3 – EXEMPLO DE CRUZAMENTO DE DOSI PONTOS

Cruzamento Uniforme: no cruzamento uniforme é gerado um indivíduo que é denominado como máscara de bits aleatórios.

Se o primeiro bit da máscara é 1, então o primeiro bit do Pai1 é copiado para o primeiro bit do filho1, caso contrário o primeiro bit do pai2 é copiado. O processo se repete para os bits restantes do filho1.

Na geração do segundo filho, o processo é invertido. Se o valor na máscara é 1, então será copiado o bit do pai2. Se o bit for 0 será copiado o bit do pai1, conforme apresentado na Figura 3.4.

O filho contém uma recombinação genética, ou seja, tem características dos dois pais. O número de troca de pontos não é fixo, costuma-se utilizar a metade do comprimento do indivíduo, metade do número de genes, como as quantidades de pontos que serão trocados entrem os pais na criação do indivíduo (BEASLEY, BULL e MARTIN, 1993).

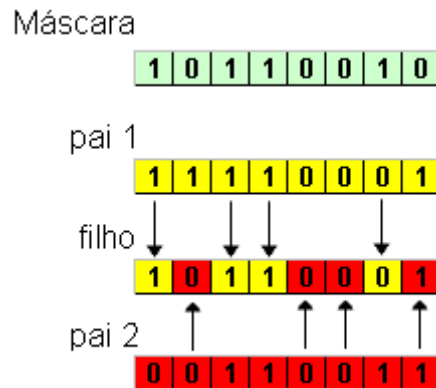


FIGURA 3.4 – EXEMPLO DE CRUZAMENTO UNIFORME

Cruzamento Disperso: o algoritmo cria um vetor binário aleatório, e então seleciona os genes onde a posição no vetor é um 1 no primeiro pai, e os genes onde a posição no vetor é 0 no segundo pai, fazendo a combinação dos genes para compor o indivíduo filho, como mostrado na Figura 3.5 a seguir.

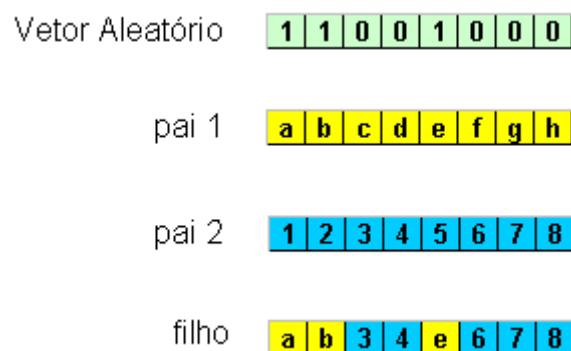


FIGURA 3.5 – EXEMPLO DE CRUZAMENTO DISPERSO

O cruzamento, dentre todos os operadores genéticos, é o mais importante para a exploração rápida do espaço de busca. Quando se aplicam os operadores genéticos toda a população ser substituída por uma nova população, e isso ocorre a cada nova geração. Então, corre-se o risco de perder um indivíduo de alta aptidão

podendo este não ser criado nas gerações sucessivas. Para que isto não ocorra, aplica-se o elitismo, como descrito a seguir.

Elitismo: o elitismo tem como função copiar os melhores indivíduos de uma geração para a próxima geração. Por exemplo, copiar os dois melhores indivíduos para a próxima geração, conforme demonstrado na Figura 3.6.

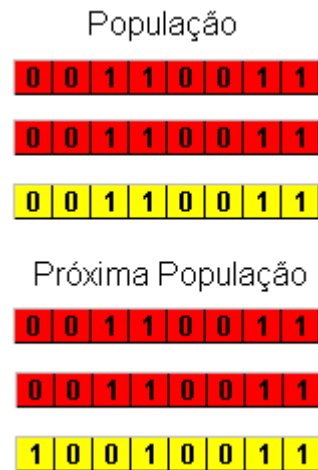


FIGURA 3.6 – EXEMPLO DE ELITISMO

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De um modo em geral, os AGs apresentam-se como uma ótima ferramenta na solução de problemas de otimização, sendo que os operadores genéticos auxiliam na busca por melhores soluções, os cruzamentos auxiliam na criação de novos bons indivíduos, a mutação evita o problema dos mínimos locais e o elitismo evita que os melhores indivíduos sejam perdidos a cada geração, tornando assim, o algoritmo uma opção robusta e eficaz para a aplicação no problema de alocação de reativos.

No próximo capítulo será apresentada a formulação matemática do problema de alocação de banco de capacitores adotada nesse trabalho.

4 METODOLOGIA

4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por finalidade apresentar a formulação matemática do problema de otimização relacionado à alocação de bancos de capacitores nas redes primária e secundária. E ainda, são apresentados detalhes da formulação dos circuitos primários e secundários para execução do FP e detalhes da implementação dos AGs para o referido problema.

Esse problema de otimização é multiobjetivo, sendo que se pretende minimizar os custos de investimentos, perdas, violação de tensão e maximizar o aumento de consumo no secundário.

O horizonte de tempo considerado é de quinze anos para BCs do primário e de cinco anos para BCs do secundário (alocação exclusiva no secundário e alocação exclusiva no primário e mista, respectivamente), contabilizando carga pesada, média e leve para dias úteis, sábados e domingos/feriados. Assim, considera-se nove patamares de carga (quinze anos para condição mista e exclusiva no primário ou cinco anos para condição exclusiva no secundário) no estudo.

Além de alocação de capacitores no secundário, esse trabalho apresenta outro diferencial que é a utilização de análise financeira a fim de se formular os custos relacionados ao problema em mente.

Assim, segue-se, primeiramente, uma breve revisão de definições relacionadas à matemática financeira e que foram utilizadas nesse trabalho.

4.2 DEFINIÇÕES DE INDICADORES DE VIABILIDADE ECONÔMICA

- a) Taxa Mínima de Atratividade (TMA): valor mínimo que a rentabilidade de um dado empreendimento deve alcançar para que este projeto seja viável do ponto de vista do empreendedor. Projetos que apresentem indicadores de

viabilidade positivos, mas que não forneçam esta taxa mínima de retorno não são considerados aplicações interessantes.

b) Valor Presente dado um Valor Futuro (VP):

$$VP = \frac{F}{(1+r)^n} \quad (4.1)$$

Onde: F : valor futuro;

r : taxa de juros;

n : período.

c) Valor Presente de uma Anuidade (VP): é uma série uniforme de pagamentos regulares que dura um número determinado de períodos.

$$VP = C \left[\frac{1}{r} - \frac{1}{r(1+r)^n} \right] \quad (4.2)$$

Onde: C : valor presente de um fluxo de caixa;

r : taxa de juros;

n : período.

d) Valor Presente Líquido (VPL): valor que o balanço de um projeto teria se todos seus custos e benefícios fossem trazidos para o momento inicial, ou seja, se fosse calculado o valor presente de cada uma das parcelas que compõem o fluxo de caixa deste projeto ao longo de sua vida útil (Figura 4.1). Podemos equacionar o VPL da seguinte maneira:

$$VPL = -C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+r)^i} \quad (4.3)$$

Onde: C_0 : montante a ser aplicado na data zero;

C_i : fluxo de caixa na data i ;

r : taxa de juros;

n : nº de período em anos.

É feita a suposição de que o fluxo de caixa inicial, C_0 , é negativo, porque representa um investimento (ROSS, 1995).

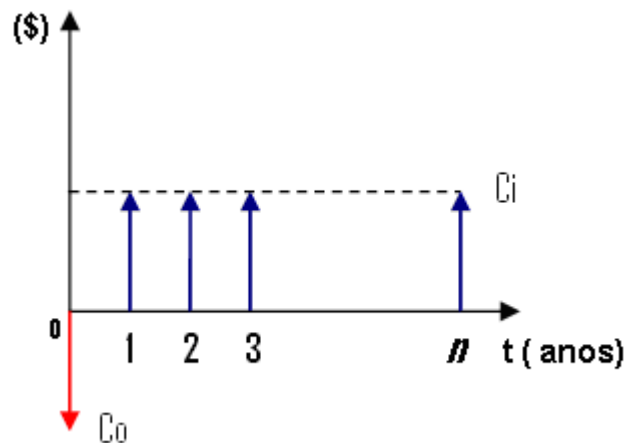


FIGURA 4.1 – REPRESENTAÇÃO DO VPL

- e) Taxa Interna de Retorno (TIR): é a taxa intrínseca de juros que teoricamente tornaria nulo o valor presente líquido de um dado investimento. Esse indicador é comparado à taxa mínima de atratividade para determinar a viabilidade do projeto.

$$0 = -C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+r)^i} \quad (4.4)$$

- f) Tempo de Retorno (TR): é o valor que expressa em quanto tempo ter-se-ia de volta o valor investido no projeto. Pode ser descontado, quando se considera a taxa de juros, ou não-descontado, quando não considera o efeito da taxa de juros. O método não-descontado, apesar de possuir uma série de restrições à sua utilização, é um dos métodos mais difundidos.

$$TR = \frac{CIVT}{BEN} \quad (4.5)$$

onde: *TR*: tempo de retorno simples;

CIVT: custo de investimento;

BEN: benefício.

4.3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA FUNÇÃO OBJETIVO

O problema de alocação de BCs em redes primárias e secundárias de distribuição consiste em resolver uma função não linear inteira-mista. Pode-se considerar que a parte clássica de alocação de BCs consiste em redução de perdas de

energia e redução de custo de instalação dos BCs fixos e automáticos. Paralelamente deve, se respeitar a Resolução n° 505/2001 da ANEEL que atribui níveis adequado, precário e crítico com relação ao perfil de tensão (penalização por não atendimento). Outro aspecto importante a citar nesta função objetivo é a inclusão da quantificação da elevação do consumo de energia no secundário, pois instantaneamente verifica-se a melhora do nível de tensão e o retorno monetário do aumento do consumo após o período.

Assim segue-se que os elementos que compõem a função objetivo são:

- Custos de Investimentos;
- Redução das Perdas;
- Redução da Violação de Tensão;
- Aumento de Consumo no secundário.

4.3.1 Custos de Investimentos

Os custos de investimentos para alocação de BCs resumem-se ao custo de aquisição dos equipamentos para rede primária e secundária de distribuição, embora possam ser colocadas juntamente manutenções preventivas e corretivas dos mesmos, bem como os custos de instalação. A equação mostra a composição dos custos de investimentos.

$$CI = \sum_{j \in \varphi} [(x_j^{fixo} \cdot Co_j^{fixo}) + (x_j^{aut} \cdot Co_j^{aut})] + \sum_{s \in \alpha} (x_s \cdot Co_s) \quad (4.6)$$

onde: CI - custo de investimento;

φ - conjunto das barras candidatas à alocação de capacitores no primário;

α - conjunto das barras candidatas à alocação de capacitores no secundário;

$x_j^{fixo} = 1$, se o capacitor for fixo e instalado na barra j e igual a zero caso contrário;

$x_j^{aut} = 1$, se o capacitor for automático e instalado na barra j e igual zero caso contrário;

$x_s = 1$, se capacitor instalado na barra do secundário;

Co_j^{fixo} - custo fixo de instalação de capacitor fixo no primário;

Co_j^{aut} - custo fixo de instalação de capacitor automático no primário;

Co_s - custo fixo de instalação de capacitor fixo no secundário.

4.3.2 Redução das Perdas

As perdas de potência ativa para cada uma das nove condições de carga consideradas são calculadas utilizando-se valores de tensão obtidos pelo algoritmo de FP para cada patamar de carga.

Uma vez obtidos os valores das perdas totais de potência ativa para cada condição de carga em cada dia da semana, pode-se obter o valor da energia total consumida pelas perdas durante todo um ano através da seguinte equação:

$$Energia = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 Perdas_{i,j} \cdot Horas_{i,j} \cdot Dias_j \quad (4.7)$$

onde: i - corresponde a condição de carga pesada, média e leve;

j - correspondem ao número de dias úteis, sábados e domingos/feriados;

$Perdas_{i,j}$ - perda de potência ativa correspondente à condição da carga i no dia j ;

$Horas_{i,j}$ - número de horas correspondente à condição de carga i no dia j ;

$Dias_j$ - número de dias; no período de um ano.

Os valores de horas e número de dias são obtidos de acordo com as curvas de carga do alimentador, levando-se em conta os patamares de carga pesada, média e leve para os dias úteis, sábados e domingos/feriados, ao longo de um ano. Logo, encontra-se a energia consumida num período de um ano.

O sistema é composto por barras do primário e do secundário, com isto necessitam-se de dois valores diferentes de custo de energia (ELEKTRO, 2008). Quando a melhoria ocorre nas barras do primário seu reflexo é sentido no patamar superior de tensão mensurado com o custo do valor A_{3a} . Assim melhoria no secundário é mensurada com o custo do valor de A_4 .

Para a obtenção do VPL necessita-se apenas a variação de energia, para sua quantificação.

$$CP = (A_{3a} \cdot \Delta Energia_1 + A_4 \cdot \Delta Energia_2) \quad (4.8)$$

onde: CP - custo das perdas de energia no primário e secundário;

A_{3a} - (30 kV a 44kV) valor da energia do subgrupo (convencional);

A_4 - (2,3 kV a 25 kV) valor da energia do subgrupo (convencional);

$\Delta Energia_1$ - variação de perdas no primário;

$\Delta Energia_2$ - variação de perdas no secundário.

4.3.3 Redução da Violação de Tensão

A Resolução N° 505, de 26 de novembro de 2001 da ANEEL, determina que o sistema elétrico deve atender aos níveis de tensão de energia elétrica (

Tabela 4.1 – Níveis de Tensão em regime permanente preestabelecidos), sendo que estes são fiscalizados e sujeitos a multas.

A ANEEL através da resolução 505/2001 define os níveis de tensão de atendimento mostrado abaixo:

- Tensão de Atendimento (TA): valor eficaz de tensão no ponto de entrega ou conexão, obtido por meio de medição, podendo ser classificada em adequada, precária ou crítica, de acordo com a leitura efetuada, expresso em volts ou quilovolts;
- Tensão Contratada (TC): valor eficaz de tensão que deverá ser informado ao consumidor por escrito, ou estabelecido em contrato, expresso em volts ou quilovolts;
- Tensão de leitura (TL): valor eficaz de tensão, integralizado a cada 10 (dez) minutos, obtidos de medição por meio de equipamentos apropriados, expresso em volts ou quilovolts;
- Tensão Nominal (TN): valor eficaz de tensão pelo qual o sistema é projetado, expresso em quilovolts.

TABELA 4.1 – NÍVEIS DE TENSÃO

Pontos de entrega ou conexão em TN superior a 1 kV e inferior a 69 kV.	
Classificação da Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de variação da Tensão de leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)
Adequada	$0,93 \text{ TC} \leq \text{TL} \leq 1,05 \text{ TC}$
Precária	$0,90 \text{ TC} \leq \text{TL} < 0,93 \text{ TC}$
Crítica	$\text{TL} < 0,90 \text{ TC}$ ou $\text{TL} > 1,05 \text{ TC}$

E a Figura 4.2 ilustra a classificação de tensão fornecida pela Tabela 4.1.

- A resolução n° 505, de 26 de novembro de 2001 da ANEEL.

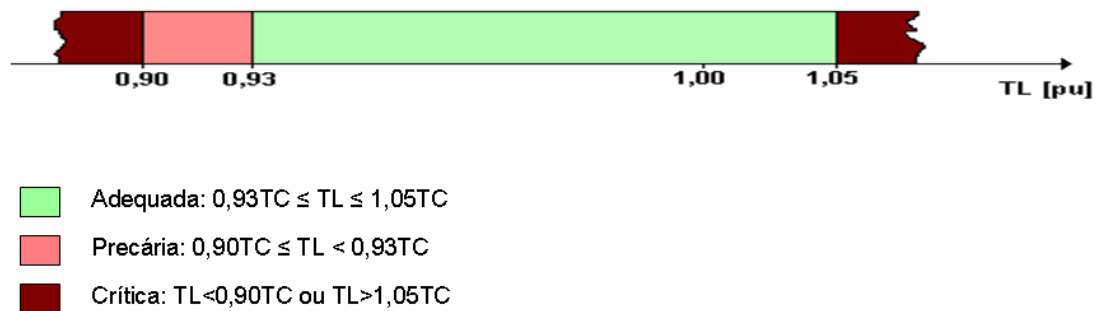


FIGURA 4.2 – NÍVEIS DE TENSÃO

Esta fiscalização pode ser enquadrada em índices individuais, tais como (Resolução 505, de 26 de Novembro 2001 ANEEL):

(i) DRP

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \cdot 100 \quad (4.9)$$

onde: *DRP*: Duração relativa da Transgressão de Tensão Precária;

nlp: número de leituras situadas nas faixas precárias;

1008: número de medições no período de sete dias com intervalos de dez minutos.

(ii) DRC

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \cdot 100 \quad (4.10)$$

onde: *DRC*: Duração relativa da Transgressão de Tensão Crítica;

nlc: número de leituras situadas nas faixas Críticas;

1008: número de medições no período de sete dias com intervalos de dez minutos.

Os índices individuais DRP e DRC são usados para a formulação da compensação do serviço prestado inadequado pelas distribuidoras de energia, tal compensação é dada por:

$$CV_t = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \left[\left(\frac{DRP-3}{100} \cdot K_1 + \frac{DRC-0,5}{100} \cdot K_2 \right) \cdot K_3 \right] \quad (4.11)$$

onde: CV_t : custo de violação de tensão;

i - corresponde a condição de carga pesada, média e leve;

j - correspondem ao número de dias úteis, sábados e domingos/feriados;

$K_1 = 1$;

$K_2 = 4$; para unidades consumidoras atendidas em Baixa Tensão;

$K_2 = 2$; para unidades consumidoras atendidas em Média Tensão;

$K_2 = 1$; para unidades consumidoras atendidas em Alta Tensão;

DRP = Valor do DRP expresso em %, apurado na última medição;

DRC = Valor do DRC expresso em %, apurado na última medição;

K_3 = valor líquido da fatura de energia elétrica ou do encargo de uso do sistema de distribuição, referente ao mês de apuração.

4.3.4 Elevação de Consumo de Acordo com a Elevação de Tensão no Secundário

Essa parcela quantifica a elevação do consumo de acordo com a elevação de tensão, e está baseada nas observações do comportamento da tensão da rede de distribuição monitorada e no comportamento da potência ativa na mesma rede.

Deve-se ressaltar que a simples comparação dos resultados da monitoração antes e depois da aplicação dos BCs pode não condizer com a expectativa técnica obtida de acordo com as simulações. Existem diversas variáveis que podem influenciar no sistema, variações na tensão primária, diferença natural do comportamento do consumo de uma semana para outra, variações climáticas regionais, entre outras.

Adotando-se uma divisão das cargas de 20% do tipo de potência constante e 80% do tipo impedância constante para carga residencial, ou seja, obtém-se (ELEKTRO, 2005):

$$P_f = 0,2 \cdot P_i + 0,8 \cdot P_i \cdot \left(\frac{V_f}{V_i} \right)^2 \quad (4.12)$$

onde: P_f : é a potência final;

P_i : é a potência inicial;

V_f : é a tensão final;

V_i : é a tensão inicial.

Essa divisão de cargas foi assumida em função dos ajustes realizados nos modelos utilizados nas simulações para que houvesse concordância com os níveis de conteúdo harmônico encontrados nos dados das medições do projeto da ELEKTRO.

Logo,

$$\frac{P_f}{P_i} = 0,2 + 0,8 \cdot \left(\frac{V_f}{V_i} \right)^2 \quad (4.13)$$

Derivando-se a expressão obtém-se a taxa de variação de potência para variação de tensão:

$$\frac{\Psi P}{\Psi V} \approx 1,6 \quad (4.14)$$

a qual é aceitável para variações de tensão até 10%.

Logo o aumento de consumo na barra do secundário é dado por (ELEKTRO, 2005):

$$C_{ac} = \sum_{g=B} \left[Potência \cdot 1,6 \cdot (\Psi V - 1) \right] \cdot A_4 \cdot Horas_{i,j} \cdot Dias_j \quad (4.15)$$

onde: C_{ac} : custo do aumento de consumo nas barras do secundário;

g : é a barra em análise pertencente ao conjunto de barras do circuito secundário (B) com $\Psi V > 1$;

Potência : é potência ativa da carga instalada na barra;

ΨV : é o aumento de tensão em pu ($V_{final} / V_{inicial}$).

4.3.5 Composição Final da Função Objetivo

Pretende-se maximizar o VPL, obtido a partir dos quatro fatores mencionados anteriormente. O investimento, tem caráter negativo (CI), a redução das perdas (CP), redução da violação de tensão (CV_t) e aumento de consumo nas barras do secundário tem caráter positivo (C_{ac}), como representados nas Figuras 4.3, 4.4, e 4.5.

Outro critério importante desta formulação é a vida útil dos BCs. Para os BCs da rede primária a vida útil gira em torno de quinze anos e para os BCs do secundário sua vida útil é de cinco anos. Assim, a função objetivo (FO) a ser minimizada é:

$$FO = \min \left(\frac{1}{VPL} \right) \quad (4.16)$$

s.a. $VPL > 0$

onde: FO : função objetivo a ser minimizada;

VPL : valor presente líquido.

Segundo ROSS (1995) o critério de análise do VPL é:

- Se $VPL > 0$ se aceita o investimento, ou seja, faz se locação de BCs na rede;
- Se $VPL = 0$ é indiferente aceitar ou rejeitar o investimento;
- Se $VPL < 0$ não aceita o investimento, ou seja, não se aloca BCs na rede.

As figuras 4.3 a 4.5 mostram os investimentos (valores negativos) e os custos de retorno (valores positivos) para todas as simulações desta dissertação.

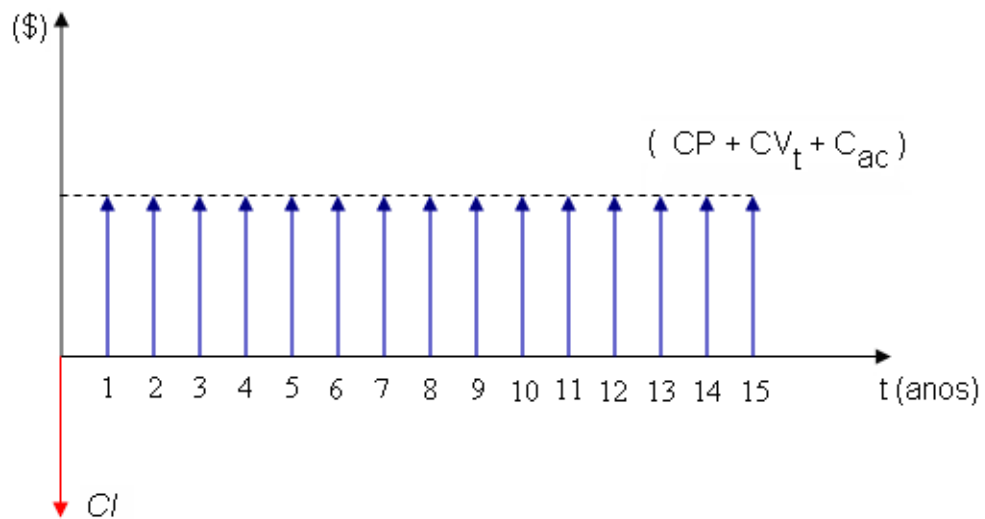


FIGURA 4.3 – VPL CONSIDERANDO APENAS ALOCAÇÃO NO PRIMÁRIO

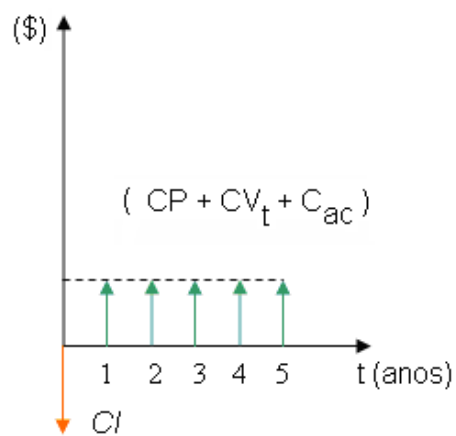


FIGURA 4.4 – VPL CONSIDERANDO APENAS ALOCAÇÃO NO SECUNDÁRIO

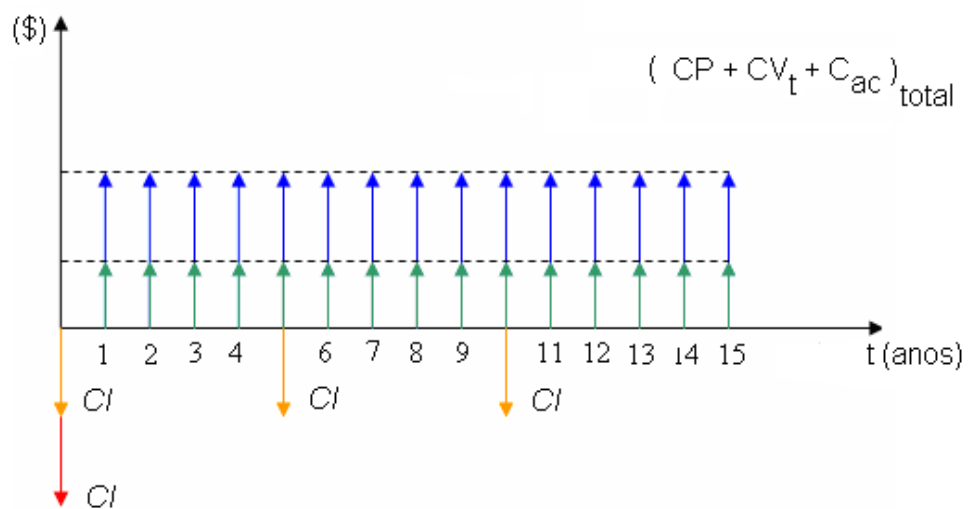


FIGURA 4.5 – VPL CONSIDERANDO ALOCAÇÃO MISTA

4.4 ACOPLAMENTO DAS BARRAS DO SECUNDÁRIO

A topologia usual do sistema de distribuição, conforme Figura 4.6, é composta basicamente de uma unidade de fornecimento de energia, barras do primário (subestação), impedâncias de linhas de distribuição, cargas do primário, transformadores, barras do secundário (poste com transformadores) e cargas do secundário.

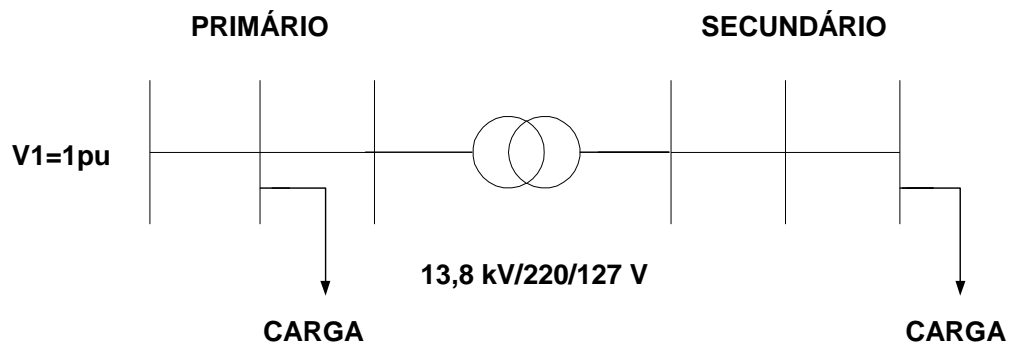


FIGURA 4.6 – TOPOLOGIA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

Para o acoplamento das barras do secundário Figura 4.7 aplicaram-se os seguintes critérios:

- Identificar quais são as barras do primário e quais são as barras do secundário;
- Inserir impedância dos transformadores como impedância de ligação entre barras do primário e secundário;
- Fazer mudança de bases e choque de bases para o sistema em geral das impedâncias e carga, referidas ao primário;

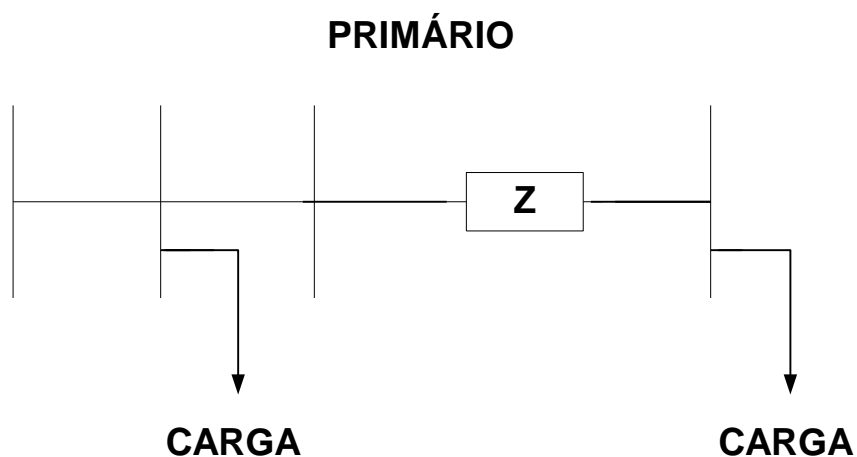


FIGURA 4.7 – ACOPLAMENTO DAS BARRAS DO SECUNDÁRIO

4.5 CODIFICAÇÃO DO INDIVÍDUO

A codificação do indivíduo é extremamente importante para o desempenho (busca) dos AGs, pois pode torná-lo lento demais devido ao tamanho do indivíduo ou causar a necessidade de um número muito grande de gerações para obter uma boa solução.

O indivíduo é composto por dois moldes, BCs primário (Molde 1) e um molde dos BCs secundário (Molde 2).

Utilizando a metodologia da COPEL (1992) consideram-se no máximo três BCs no primário, podendo-se alocar apenas dois, um ou nenhum BCs nas barras do primário.

Os BCs no secundário ficam livres por quantidade exceto por tipo de barra, ou seja, somente poder ser instalado nas barras do secundário.

A Figura 4.8 exemplifica a composição do indivíduo.



FIGURA 4.8 – REPRESENTAÇÃO DO INDIVÍDUO

4.5.1 Codificação das Barras para BCs do Primário

A codificação geral dos BCs no primário segue a seguinte regra:

$$2^n \geq BP \quad (4.17)$$

onde: n: número de bits necessário para a decodificação do indivíduo das barras do primário, o qual deve ser o primeiro número inteiro;

BP: barras do primário.

Outro fator importante a ser citado na decodificação dos BCs é a não penalização do indivíduo, onde todas as gerações são computadas pelos AGs e aproveitadas. Assim, quando o indivíduo possui o tamanho exato do número de *bits*, a decodificação é perfeita. O problema ocorre quando o número de *bits* oferece um maior número de possibilidades dando então duas condições: a primeira, podemos penalizar os indivíduos descartando sua decodificação através da FO. A segunda faz-se uma recontagem indicando apenas o “endereço” do indivíduo e não a posição real do vetor conforme Figura 4.9.

Para ilustrar esse procedimento, considere um sistema de 16 barras onde 11 barras são do primário e 5 barras do secundário. Assim, empregando-se 4 bits proporciona-se 16 possibilidades sendo somente as 11 primeiras combinações utilizadas para endereçar as barras do primário e as restantes redirecionadas para nova contagem, ver Figura 4.9.

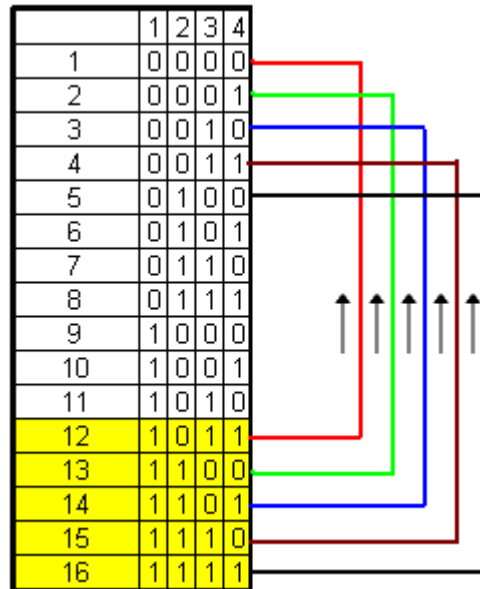


FIGURA 4.9 – DECODIFICAÇÃO DAS BARRAS DOS BCS DO PRIMÁRIO

4.5.2 Codificação das Barras para BCs do Secundário

Numa linha geral de raciocínio o mesmo é aplicado para a decodificação das barras do secundário, levando em consideração que somente serão considerados as barras do secundário ver Figura 4.10.

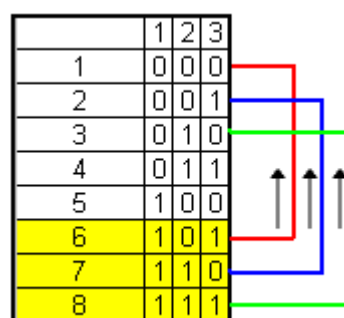


FIGURA 4.10 – DECODIFICAÇÃO DAS BARRAS DOS BCS DO SECUNDÁRIO

4.5.3 Codificação para Potências dos BCs do Primário

BCs no primário são comumente utilizados pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica. A Tabela 4.2 apresenta os tamanhos dos BCs considerados neste estudo, sendo que o valor zero representa a não instalação de capacitores.

TABELA 4.2 – TAMANHO DE BCS NO PRIMÁRIO

Tamanho do BCs [kvar]
0
300
600
900
1200

O método para o cálculo de número de *bits* a ser utilizado é similar para o cálculo de barras para BCs no primário e secundário.

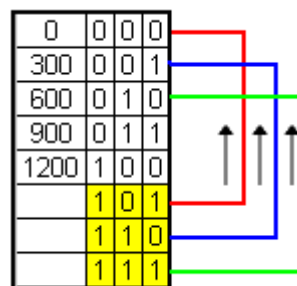


FIGURA 4.11 – DECODIFICAÇÃO DAS POTÊNCIAS DOS BCS DO PRIMÁRIO

4.5.4 Codificação para as Potências dos BCs do Secundário

Por fim, segue a decodificação das potências dos BCs do secundário. Os BCs aplicados são os usuais do mercado, e contemplam a faixa de potência de 5 a 20 kvar. A Tabela 4.3 apresenta o tamanho dos BCs considerados neste estudo, sendo que o valor zero representa a não instalação dos capacitores.

TABELA 4.3 – TAMANHO DE BCS NO SECUNDÁRIO

Tamanho do BCs [kvar]
0
5
7,5
10
15
20

O método para o cálculo de número de *bits* a ser utilizado é similar para o cálculo de barras para BCs no primário (Figura 4.12).

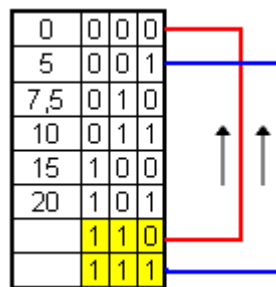


FIGURA 4.12 – DECODIFICAÇÃO DAS POTÊNCIAS DOS BCS DO SECUNDÁRIO

4.5.5 Codificação do tipo dos BCs do Primário

Esta codificação para solução de BCs automáticos é formada por um único *bit*. Se o valor desse *bit* for igual a 1, aloca-se BC automático, se for igual a 0, não aloca-se banco automático. Deve-se ressaltar que BC fixos são aplicados para carga pesada, média e leve, e os automáticos são desligados na leve e ligados na carga pesada e média. Para o molde do capacitor do secundário só existe BCs fixos.

4.5.6 Exemplo de Codificação

Esse exemplo consiste em facilitar a compreensão da decodificação de um indivíduo. O exemplo considerado é o sistema de 16 barras Figura 4.13.



FIGURA 4.13 – EXEMPLO DE DECODIFICAÇÃO DO INDÍVIDUO

O molde do capacitor do primário para este caso tem oito bits no total, sendo que os quatro bits da esquerda correspondem em qual barra é alocado o BC, o quinto bit da esquerda para a direita corresponde ao tipo e os três últimos correspondem ao tamanho do BC. O mesmo ocorre para o BC do secundário, lembrando que o mesmo não possui tipo.

A decodificação do indivíduo é composto por três BCs no primário, sendo 3 alocados nas barras 10, 4 e 6, respectivamente e um BC na barra 3 do secundário. Quanto ao tipo são automático, fixo e fixo e de 300 kvar, 900 kvar, 600 kvar respectivamente e o BCs secundário é de 5 kvar.

4.6 PROCEDIMENTO DE MEMORIZAÇÃO DE SOLUÇÕES JÁ BUSCADAS

O procedimento de memorização de soluções já buscadas (memória) foi introduzida na metodologia com a finalidade de acelerar a convergência do processo iterativo controlado pelos AGs (SZUVOVIVSKI, 2008).

Na memória é armazenada a solução completa proposta pelos AGs e o valor da FO. Seu princípio de funcionamento é o seguinte: após a decodificação do indivíduo binário, tem-se a solução proposta pelos AGs, esta solução é então buscada na memória. Caso esta solução seja encontrada, junto com ela estará o valor da FO, o qual será recuperado e devolvido aos AGs, evitando assim, que todos os cálculos de fluxo de potência e da FO sejam refeitos para uma solução que já havia sido avaliada antes. Caso a solução não seja encontrada, os cálculos são feitos normalmente e no final, antes do valor da FO ser passado para os AGs, a solução é gravada na memória juntamente com o respectivo valor da FO.

O benefício da memória pode ser visualizado já na simulação da segunda população de indivíduos, pois o operador genético de elitismo garante, pelo menos, o melhor indivíduo para a próxima geração.

No entanto, quanto mais soluções são testadas mais resultados são armazenados na memória e, por consequência, nas próximas gerações mais resultados são encontrados na memória, de forma a acelerar o processo de convergência dos AG.

4.7 PARÂMETROS DOS AG

As principais características dos AGs juntamente com as configurações dos seus parâmetros são mostrados na Tabela 4.4.

TABELA 4.4 – CONFIGURAÇÃO DO AG

Características	Parâmetros	Configurado
Indivíduo	Codificação Número de <i>Bits</i>	Binária Depende das Opções ¹
População	Tamanho Inicial	10 Indivíduos aleatório
Seleção	Elitismo Método	2 Indivíduos Roleta
Cruzamento	Tipo Taxa	Disperso 70%
Mutação	Tipo Taxa	Uniforme 10%
Parada	Critério	10.000 Gerações

Notas: ¹Conforme citado anteriormente, o número de *bits* necessários para a codificação do indivíduo depende essencialmente das condições de simulação.

4.8 FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PROPOSTA

O Figura 4.12 mostra a seqüência de passos da metodologia proposta.

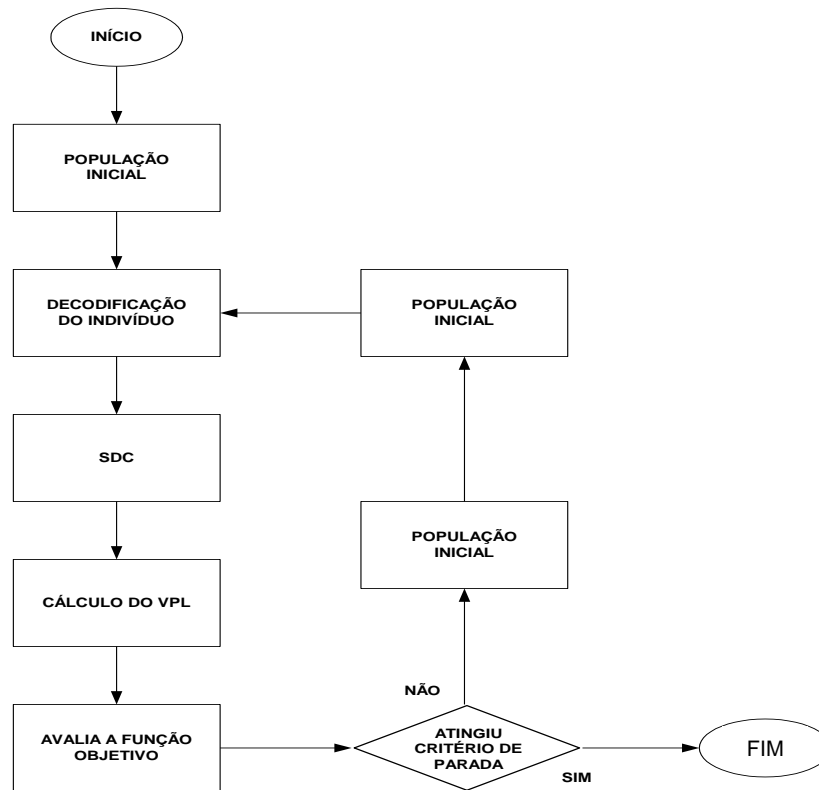


FIGURA 4.14 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA

4.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo teve como objetivo apresentar os critérios usados na formulação da FO, desde o conceito do VPL, custos dos BCs considerando em qual local (barras) são alocados, custos das perdas com diferenciação de valores de energia, a implementação da função de compensação de serviços inadequados (tensões precária e crítica) e a quantificação do aumento do consumo nas barras dos secundário.

Com isto, a análise dos testes e resultados apresentados no Capítulo 5 desta dissertação estão fundamentalmente embasados.

5 TESTES E RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo mostrar o desempenho da metodologia exposta no capítulo anterior, que foi simulado utilizando-se o *software* MATLAB v2008a.

As simulações realizadas contemplam os sistemas de 16 e 90 barras com opções de simulação conforme Figura 5.1.

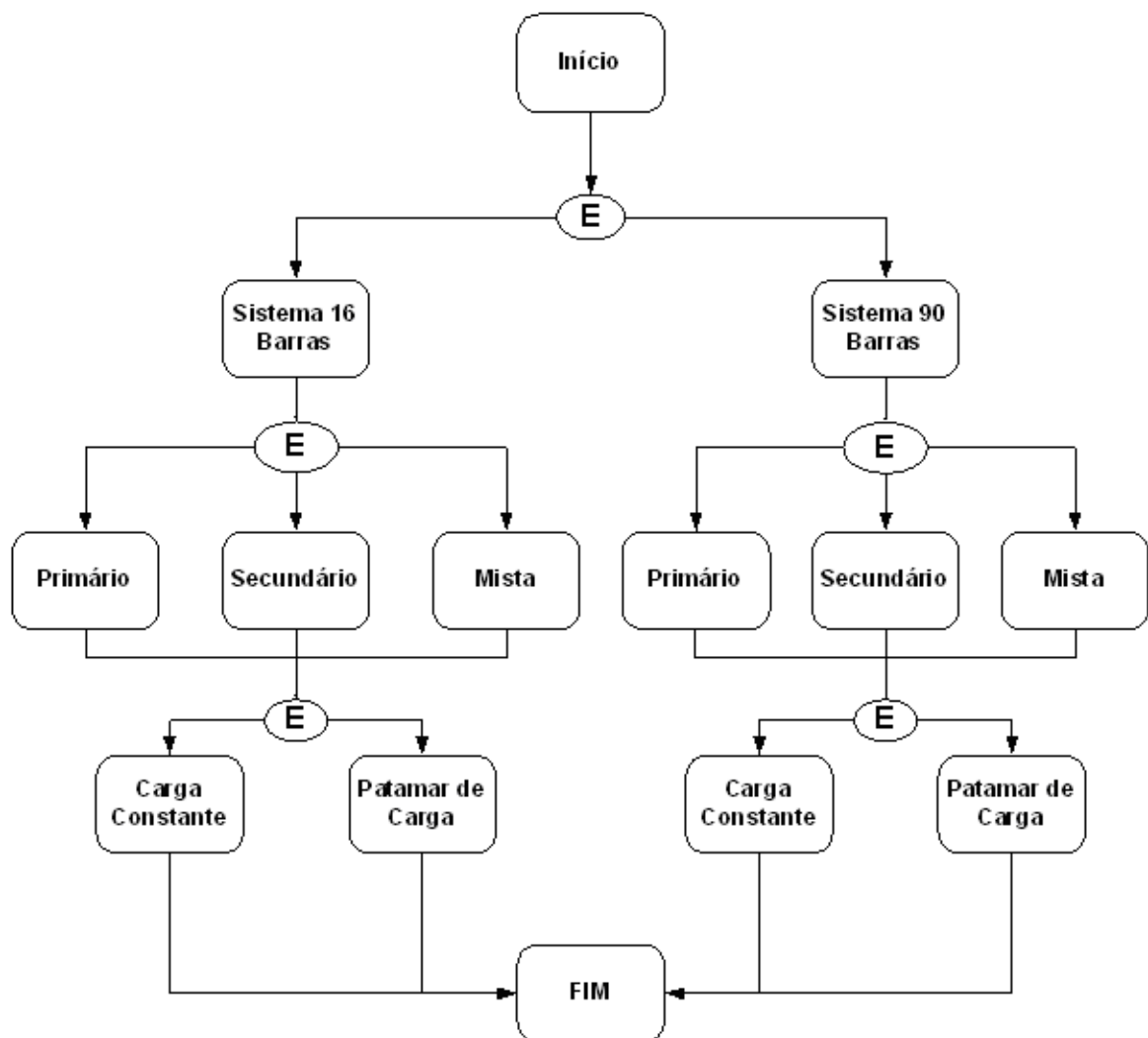


FIGURA 5.1 – SEQUÊNCIA DE PASSOS PARA A SIMULAÇÃO

5.2 CONDIÇÕES GERAIS PARA AS SIMULAÇÕES

A seguir estão relacionados as condições gerais de simulação para os sistemas citados anteriormente.

5.2.1 Condições de Carga

A FO foi testada considerando diferentes curva de carga, tais como: pesada, média e leve para dias úteis, sábados e domingos/feriados.

A Tabela 5.1 apresenta a porcentagem da carga total no alimentador para cada condição.

TABELA 5.1 – PORCENTAGEM DA CARGA TOTAL NO ALIMENTADOR PARA CADA CONDIÇÃO DE CARGA

Carga	Dia Útil	Sábado	Domingo/Feriado
Pesada (%)	130	120	110
Média (%)	80	70	60
Leve (%)	50	40	40

A Tabela 5.2 apresenta quantas horas tem cada dia da semana e a Tabela 5.3 o número de cada dia da semana por ano.

TABELA 5.2 – NÚMERO DE HORAS PARA CADA CONDIÇÃO DE CARGA

N° de Horas para cada condição de carga $Horas_{i,j}$			
Carga [i]	Dia Útil	Sábado	Domingo/Feriado
Pesada	8	6	6
Média	6	8	6
Leve	10	10	12

TABELA 5.3 – NÚMERO DE DIAS ÚTEIS, SÁBADO E DOMING/FERIADOS NUM PERÍODO DE UM ANO

Tipo [j]	<i>Dias_j</i>
Dias Úteis	261
Sábado	52

5.2.2 Tensão de Saída do Alimentador

Segundo regras da ANEEL, a tensão de saída do alimentador deve obedecer valores específicos para cada tipo de carga conforme Tabela 5.4.

TABELA 5.4 – TENSÃO DE SAÍDA DA SUBESTAÇÃO EM FUNÇÃO DOS PATAMARES DE CARGA

Patamar de Carga	Tensão de Saída do Alimentador [pu]
Carga Pesada	0,9928
Carga Média	0,9783
Carga Leve	0,9565

5.2.3 Taxa de Juros

Como o VPL, descrito na metodologia, necessita de uma taxa para a sua formulação, foi adotada a SELIC – Sistema Especial de Liquidação e Custódia estipulada pelo Banco Central do Brasil com um valor de 13,75% a.a. ou 1,1458% a.m.

5.2.4 Valor da Energia

Os grupos tarifários considerados foram os vigentes para a concessionária de distribuição de energia ELEKTRO, pois existe um projeto de pesquisa entre LACTEC/ELEKTRO nesta área de alocação de reativo, o qual forneceu alguns subsídios para a elaboração da metodologia proposta neste trabalho.

Para as barras referentes ao primário foi utilizada a tarifa A3a e A4 para o secundário, conforme Tabela 5.5.

TABELA 5.5 – VALOR DE ENERGIA

CONVENCIONAL	
GRUPO TARIFÁRIO	ENERGIA R\$/MWh
A3a (30 kV a 44 kV)	129,71
A4 (2,3 kV a 25 kV)	136,35

5.2.5 Custos do BCs do Primário

Os BCs do primário estão divididos em dois tipos, BC fixo e BC automático. As tabelas 5.6 a 5.8 apresentam os custos de aquisição conforme os tipos e tamanhos.

TABELA 5.6 – CUSTOS DO BCS DO PRIMÁRIO FIXO

POTÊNCIA NOMINAL	TENSÃO NOMINAL	PREÇO
300 kvar	13800 V	R\$ 15.970,00
600 kvar	13800 V	R\$ 17.950,00
900 kvar	13800 V	R\$ 22.120,00
1200 kvar	13800 V	R\$ 24.100,00

Observações:

- 1) Banco de capacitores compostos por célula capacitiva monofásica, 03 chaves-fusíveis, 02 chaves seccionadoras sob carga a óleo e estrutura metálica padrão para a fixação em poste com até 06 capacitores.

TABELA 5.7 – CUSTOS DOS BCS DO PRIMÁRIO AUTOMÁTICO

POTÊNCIA NOMINAL	TENSÃO NOMINAL	PREÇO
300 kvar	13800 V	R\$ 31.140,00
600 kvar	13800 V	R\$ 35.000,00
900 kvar	13800 V	R\$ 43.130,00
1200 kvar	13800 V	R\$ 47.000,00

TABELA 5.8 – CUSTOS DOS BCS DO SECUNDÁRIO

POTÊNCIA NOMINAL	TENSÃO NOMINAL	PREÇO
5,0 kvar	220 V	R\$ 678,00
7,5 kvar	220 V	R\$ 695,00
10,0 kvar	220 V	R\$ 752,00
15,0 kvar	220 V	R\$ 815,00
20,0 kvar	220 V	R\$ 929,00

5.3 SISTEMA DE 16 BARRAS

A Figura 5.2 apresenta o sistema de 16 barras simulado, cujos dados das potências ativas e reativas demandadas em cada barra e de impedância das linhas estão apresentados no Apêndice B.

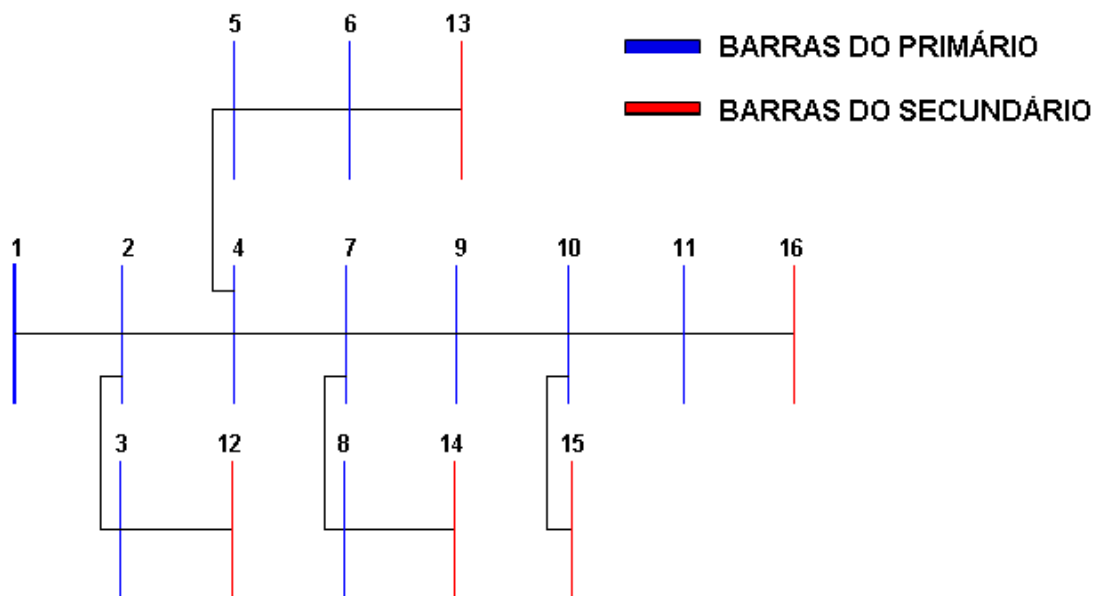


FIGURA 5.2 – SISTEMA DE 16 BARRAS

Este sistema é composto por 16 barras dentre as quais as 11 primeiras são barras do primário (sistema 11 barras) e as restantes do secundário (descrito na metodologia).

Foram realizadas três simulações para condições de carga constante e curva de carga.

As simulações apresentaram consistência quando foram atingidas 10.000 gerações de simulações, pois com 500, 1000, 3000 e 5000 gerações os AGs encontravam resultados diferentes. E, posteriormente foram feitas devidas comparações de simulações, com alocações somente na rede primária, somente na secundária e mista.

5.3.1 Sistema 16 Barras, Carga Constante, Rede Primária

Apenas alocando-se BCs no primário conseguiu-se eliminar totalmente a violação de tensão precária nas barras 14, 15 e 16. Os resultados estão apresentados nas tabelas 5.9 a 5.12. A Figura 5.3 apresenta o perfil de tensão obtido.

TABELA 5.9 – PARÂMETROS P/ ALOCAÇÃO DE BCS PRIMÁRIO

CONDIÇÕES DE PROGRAMA			
<i>Bits</i>	Melhor Tempo	Nº de Gerações	Melhor Geração
14	10'12"	10.000	57

TABELA 5.10 – ALOCAÇÃO DOS BCS DO PRIMÁRIO

ALOCAÇÃO		
BARRA	POTÊNCIA (kvar)	CUSTO (\$)
9	1200	24100,00
7	1200	24100,00
Total	2400	48200,00

TABELA 5.11 – RETORNOS FINANCEIROS

CP (\$)	CVt (\$)	Cac (\$)	VPL (\$)
27102,42	27510,00	5911,10	328240,00

TABELA 5.12 – ÍNDICES DE RETORNO FINANCEIRO

ÍNDICES ECONÔMICOS	
TIR (%)	TR [anos]
125,5668	0,8066

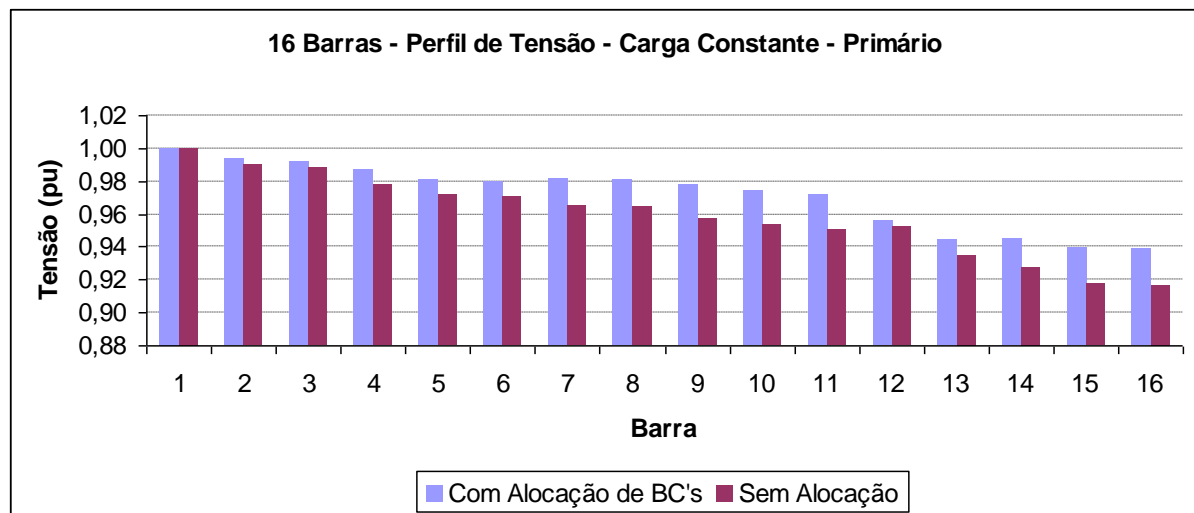


FIGURA 5.3 – PERFIL DE TENSÃO PARA CARGA CONSTANTE, PRIMÁRIO

5.3.2 Sistema 16 Barras, Carga Constante, Rede Secundária

Com alocação dos BCs no secundário não se conseguiu eliminar totalmente a violação de tensão nas barras, pois a barra 16 ainda permaneceu com violação de tensão precária. Por outro lado, obteve-se 85,43% do aumento de consumo em relação ao primário. Os resultados estão apresentados nas tabelas 5.13 a 5.16. A Figura 5.4 apresenta o perfil de tensão obtido.

TABELA 5.13 – PARÂMETROS P/ ALOCAÇÃO DE SECUNDÁRIO

CONDIÇÕES DE PROGRAMA			
<i>Bits</i>	Melhor Tempo	N° de Gerações	Melhor Geração
30	17'24"	10.000	244

TABELA 5.14 – ALOCAÇÃO DOS BCS DO SECUNDÁRIO

ALOCAÇÃO		
BARRA	POTÊNCIA (kvar)	CUSTO (\$)
13	20	929,00
16	20	929,00
15	20	929,00
12	20	929,00
14	20	929,00
Total	100	4645,00

TABELA 5.15 – RETORNOS FINANCEIROS

CP (\$)	CVt (\$)	Cac (\$)	VPL (\$)
3854,55	0	5050,13	47020,00

TABELA 5.16 – INDÍCES DE RETORNO FINANCEIRO

INDÍCES ECONÔMICOS	
TIR (%)	TR [anos]
190,7826	1,527

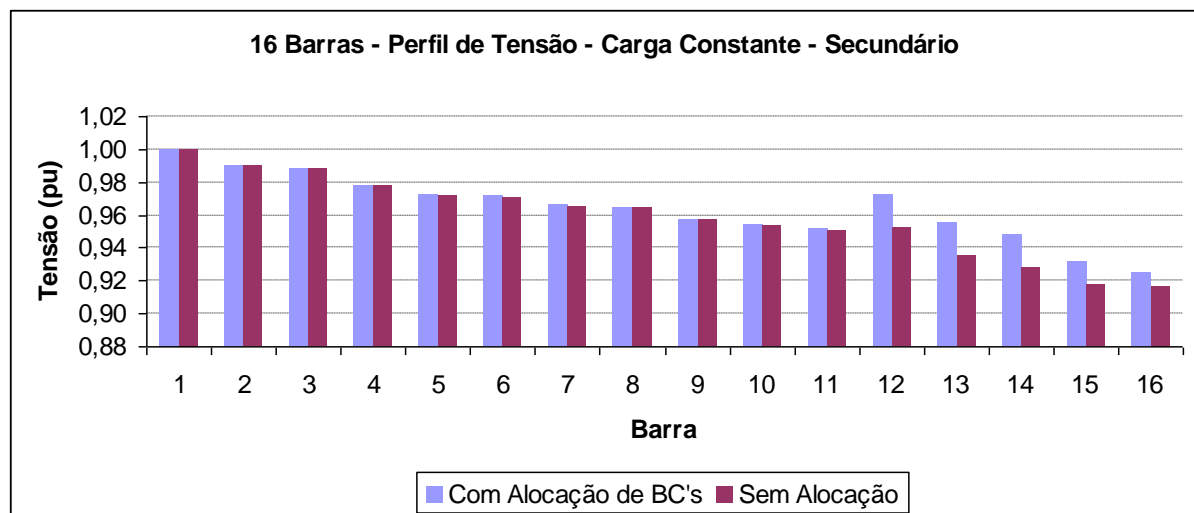


FIGURA 5.4 – PERFIL DE TENSÃO PARA CARGA CONSTANTE, SECUNDÁRIO

5.3.3 Sistema 16 Barras, Carga Constante, Mista

Neste caso obteve-se resultados semelhantes à alocação no primário, eliminando a violação de tensão, outro fato importante a salientar e com aumento significativo de consumo. O aumento de perfil de tensão nas barras foi superior do

que somente o obtido somente com alocação no primário. Os resultados estão apresentados nas tabelas 5.17 a 5.20. A Figura 5.5 apresenta o perfil de tensão obtido.

TABELA 5.17 – CONDIÇÕES DE PROGRAMA DOS BCS MISTOS

CONDIÇÕES DE PROGRAMA			
<i>Bits</i>	Melhor Tempo	N° de Gerações	Melhor Geração
44	53'53"	10.000	1335

TABELA 5.18 – ALOCAÇÕES DOS BCS MISTOS

ALOCAÇÃO		
BARRA	POTÊNCIA (kvar)	CUSTO (\$)
10	900	22120,00
7	1200	24100,00
14	20	929,00
13	20	929,00
15	20	929,00
16	20	929,00
12	20	929,00
Total	2200	50865,00

TABELA 5.19 – RETORNOS FINANCEIROS

CP (\$)	CVt (\$)	Cac (\$)	VPL(\$)
29089,00	27510,00	10726,00	364160,00

TABELA 5.20 – INDÍCES DE RETORNO FINANCEIRO

INDÍCES ECONÔMICOS	
TIR (%)	TR [anos]
132,1789	0,8994

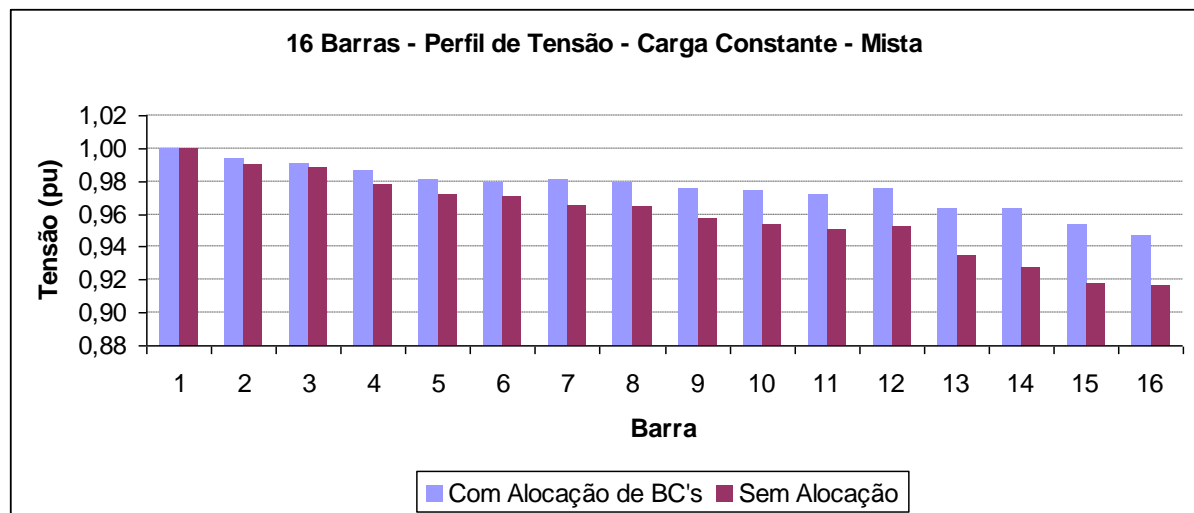


FIGURA 5.5 – PERFIL DE TENSÃO PARA CARGA CONSTANTE, MISTA

5.3.4 Sistema 16 Barras, Patamar de Carga, Rede Primária

Esta simulação apresenta dados mais próximos da realidade, devido a troca de carga constante para patamares de carga.

Com a alocação dos BCs, as barras 14, 15 e 16, que possuíam violação de tensão, passaram a ter níveis de tensão adequados. Para o sistema com carga média os resultados foram ainda melhores, pois a barra 16 que tinha condições críticas de tensões ficou estabelecida no adequado. Por fim, a condição de carga leve teve melhora, saindo de uma condição crítica e atingindo a condição precária. Os resultados só não foram melhores devido a magnitude de tensão da saída de subestação.

Os resultados estão apresentados nas tabelas 5.21 a 5.24. A Figura 5.6 apresenta o perfil de tensão obtido. Os demais gráficos estão disponíveis no Apêndice D, devido a sua quantidade e para facilidade de compreensão do leitor.

TABELA 5.21 – CONDIÇÕES DE PROGRAMA DOS BCS PRIMÁRIO

CONDIÇÕES DE PROGRAMA			
<i>Bits</i>	Melhor Tempo	Nº de Gerações	Melhor Geração
24	19'36"	10.000	2461

TABELA 5.22 – ALOCAÇÕES DOS BCS PRIMÁRIO

ALOCAÇÃO		
BARRA	POTÊNCIA (kvar)	CUSTO (\$)
7	1200	24100,00
4	1200	24100,00
10	1200	24100,00
Total	3600	72300,00

TABELA 5.23 – RETORNOS FINANCEIROS

CP (\$)	CVt (\$)	Cac (\$)	VPL (\$)
26320,00	19920,00	6600,66	256355,39

TABELA 5.24 – ÍNDICES DE RETORNO FINANCEIRO

ÍNDICES ECONÔMICOS	
TIR (%)	TR [anos]
73,0659	1,3381

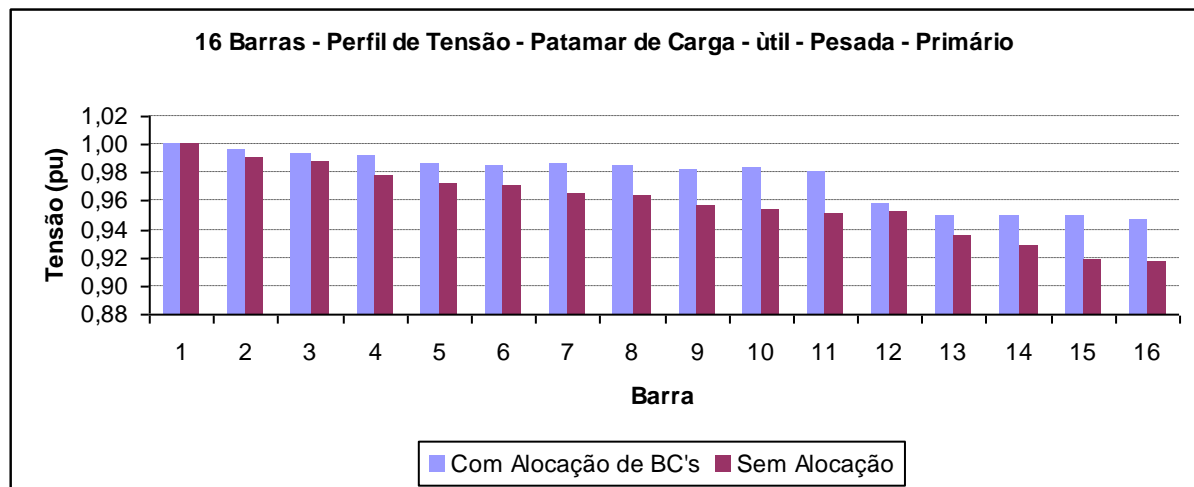


FIGURA 5.6 – PERFIL DE TENSÃO PARA PATAMAR DE CARGA DIA ÚTIL, PESADA, PRIMÁRIO

5.3.5 Sistema 16 Barras, Patamar de Carga, Rede Secundária

Para carga pesada, os BCs no secundário eliminaram a violação de tensão precária nas barras 14 e 15 e somente a barra 16 continuou com violação.

Para carga média, apresentaram-se melhoras significativas nas magnitudes de tensão. Embora somente a barra 13 tenha ficado com nível adequado de tensão.

Para carga leve, a alocação dos BCs teve somente eficiência com a barra 12, eliminando sua violação precária por completo. A barra 14 que tinha violação de tensão crítica passou para precária com folga.

Os resultados estão apresentados nas tabelas 5.25 a 5.28. A Figura 5.7 apresenta o perfil de tensão obtido. Os demais gráficos estão disponíveis no Apêndice D, devido a sua quantidade e para facilidade de compreensão do leitor.

TABELA 5.25 – PARÂMETROS P/ ALOCAÇÃO NO SECUNDÁRIO

CONDIÇÕES DE PROGRAMA			
Nº de Bits	Melhor Tempo	Nº de Gerações	Melhor Geração
30	11'25"	10.000	25

TABELA 5.26 – ALOCAÇÕES DOS BCS NO SECUNDÁRIO

ALOCAÇÃO		
BARRA	POTÊNCIA (kvar)	CUSTO (\$)
14	20	929,00
13	20	929,00
16	20	929,00
12	20	929,00
15	20	929,00
Total	100	4645,00

TABELA 5.27 – RETORNOS FINANCEIROS

CP (\$)	CVt (\$)	Cac (\$)	VPL (\$)
3909,74	2127,06	4038,69	54302,08

TABELA 5.28 – ÍNDICES DE RETORNO FINANCEIRO

ÍNDICES ECONÔMICOS	
TIR (%)	TR [anos]
216,22	1,3513

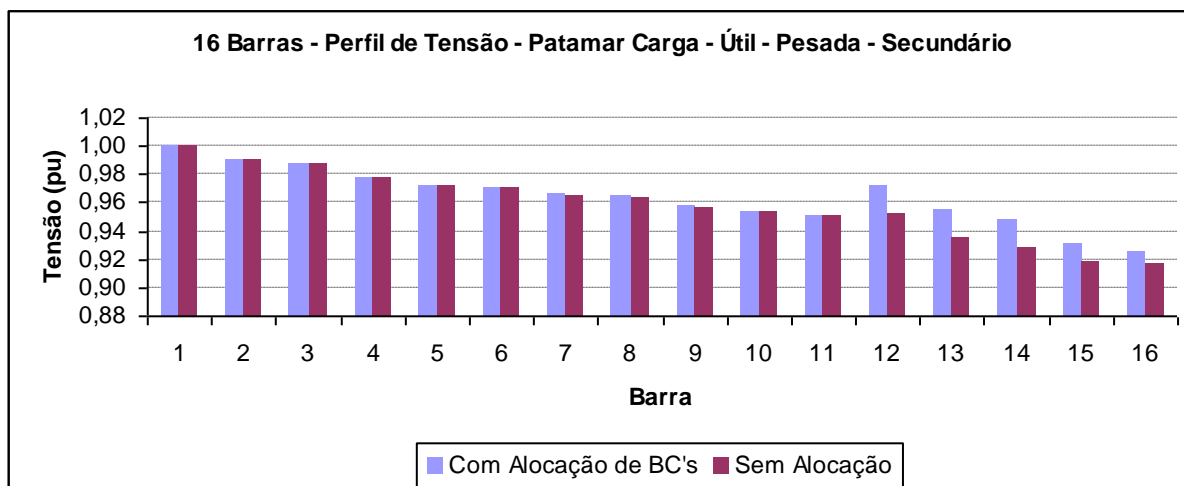


FIGURA 5.7 – PERFIL DE TENSÃO PARA PATAMAR DE CARGA DIA ÚTIL, PESADA, SECUNDÁRIO

5.3.6 Sistema 16 Barras, Patamar de Carga, Mista

Esta simulação apresentou excelentes resultados, conseguindo eliminar restrições de violação de tensões para carga pesada e média. Para carga leve, obteve-se elevação de tensão proporcionando a melhoria de restrição crítica para precária.

Com 2500 kvar de alocação obteve-se melhores resultados do que os 3600 kvar de aplicação de alocação de BC somente no primário, e também um menor tempo de retorno com um menor investimento.

Os resultados estão apresentados nas tabelas 5.29 a 5.32. A Figura 5.8 apresenta o perfil de tensão obtido. Os demais gráficos estão disponíveis no Apêndice D, devido a sua quantidade e para facilidade de compreensão do leitor.

TABELA 5.29 – PARÂMETROS P/ ALOCAÇÃO DE BCS MISTOS

CONDIÇÕES DE PROGRAMA			
<i>Bits</i>	Melhor Tempo	N° de Gerações	Melhor Geração
54	37'11"	10.000	1405

TABELA 5.30 – ALOCAÇÕES DOS BCS MISTOS

ALOCAÇÃO		
BARRA	POTÊNCIA (kvar)	CUSTO (\$)
9	1200	24100,00
7	1200	24100,00
12	20	929,00
15	20	929,00
13	20	929,00
16	20	929,00
14	20	929,00
Total	2500	52845,00

TABELA 5.31 – RETORNOS FINANCEIROS

CP (\$)	CVt (\$)	Cac (\$)	VPL (\$)
30332,70	19920,08	8839,70	310973,33

TABELA 5.32 – ÍNDICES DE RETORNO FINANCEIRO

ÍNDICES ECONÔMICOS	
TIR (%)	TR [anos]
111,58	1,0482

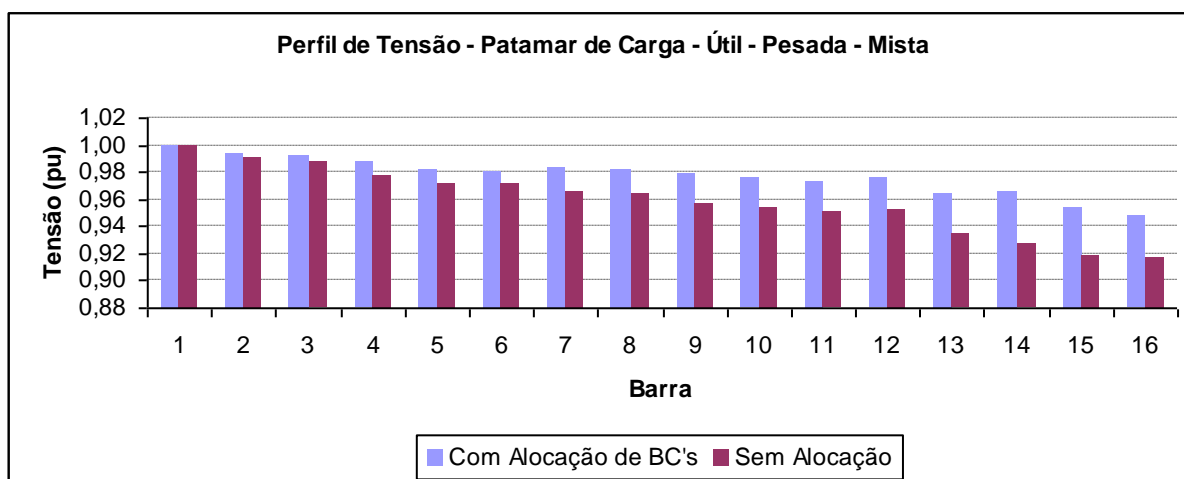


FIGURA 5.8 – PERFIL DE TENSÃO PARA PATAMAR DE CARGA DIA ÚTIL PESADA MISTA

A Tabela 5.33 sintetiza todos os resultados das simulações do sistema de 16 barras. Observa-se, pela análise da TIR que a alocação mista apresenta uma TIR melhor que a alocação exclusiva na primária, e inferior à alocação exclusiva na

secundária, ou seja, é uma solução mais interessante técnica e economicamente do que as soluções exclusivas.

TABELA 5.33 – QUADRO GERAL DE RESULTADOS DO SISTEMA 16 BARRAS

Sis	(kvar)	CI (\$)	CP (\$)	CVt (\$)	Cac (\$)	TIR (%)	TR (anos)	VPL (\$)
Pri	3600	72.300,00	26.320,00	19.920,00	6.600,66	73,0659	1,3381	256.355,39
Sec	100	4.645,00	3.909,74	2.127,06	4.038,69	216,22	1,3513	54.302,08
Mista	2500	52.845,00	30.332,70	19.920,08	8.839,70	111,58	1,0482	310.973,33

5.4 SISTEMA DE 90 BARRAS

A Figura 5.9 mostra o sistema de 90 barras simulado cujos dados das potências ativas e reativas demandadas em cada barra e de impedância das linhas estão apresentados no Apêndice C.

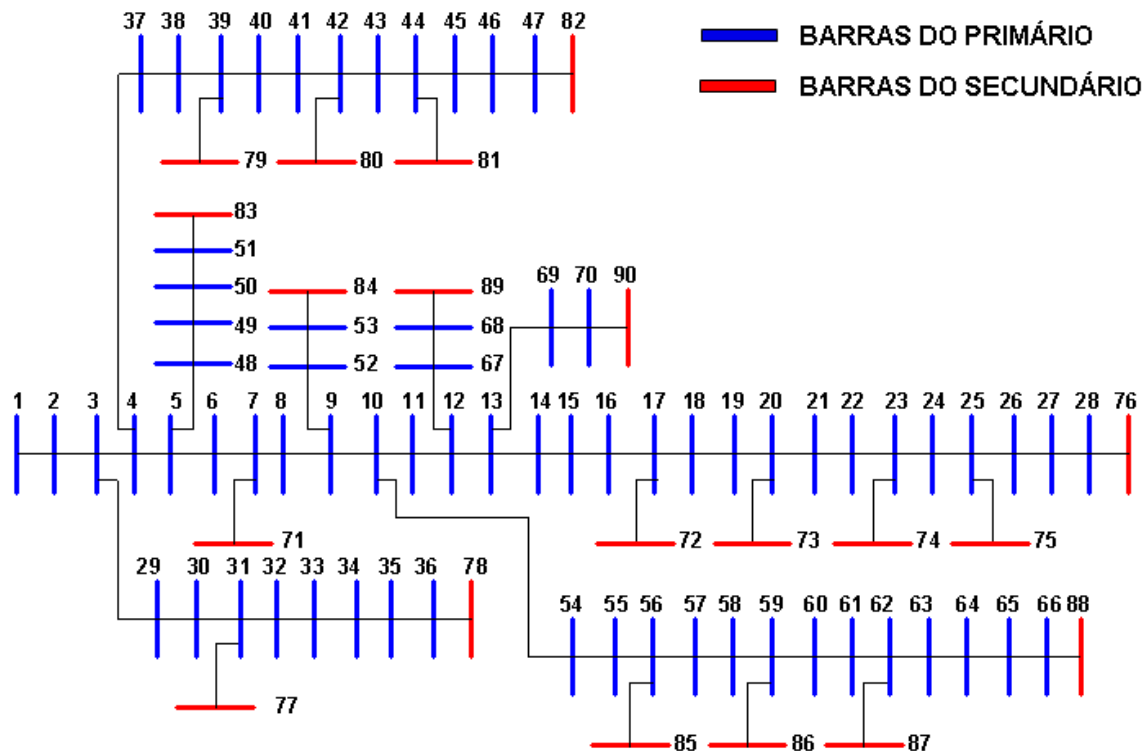


FIGURA 5.9 – SISTEMA DE 90 BARRAS

Este sistema é composto por 90 barras dentre as quais as 70 primeiras são barras do primário (sistema 70 barras) e as restantes do secundário (descrito na metodologia).

Foram realizadas três simulações para cada condição especificada de carga constante e curva de carga. E posteriormente feitas devidas comparações de simulações, somente primária, somente secundária e mista.

5.4.1 Sistema 90 Barras, Carga Constante, Rede Primária

Nesta situação apenas as barras 87 e 88 continuaram com restrições de tensão, mas mesmo assim saíram da condição crítica para a precária. Os resultados estão apresentados nas tabelas 5.34 a 5.37. A Figura 5.10 apresenta o perfil de tensão obtido.

TABELA 5.34 – PARÂMETROS DE ALOCAÇÃO DE BCS PRIMÁRIO

CONDIÇÕES DE PROGRAMA			
Nº Bits	Melhor Tempo	Nº de Gerações	Melhor Geração
30	393'19"	10.000	6226

TABELA 5.35 – ALOCAÇÕES DOS BCS PRIMÁRIO

ALOCÇÃO		
BARRA	POTÊNCIA (kvar)	CUSTO (\$)
23	300	15970,00
13	600	17950,00
63	1200	24100,00
Total	2100	58020,00

TABELA 5.36 – RETORNOS FINANCEIROS

CP (\$)	CVt (\$)	Cac (\$)	VPL (\$)
101201,61	709,02	28624,37	723042,62

TABELA 5.37 – ÍNDICES DE RETORNO FINANCEIRO

ÍNDICES ECONÔMICOS	
TIR (%)	TR [anos]
173,46	0,8464

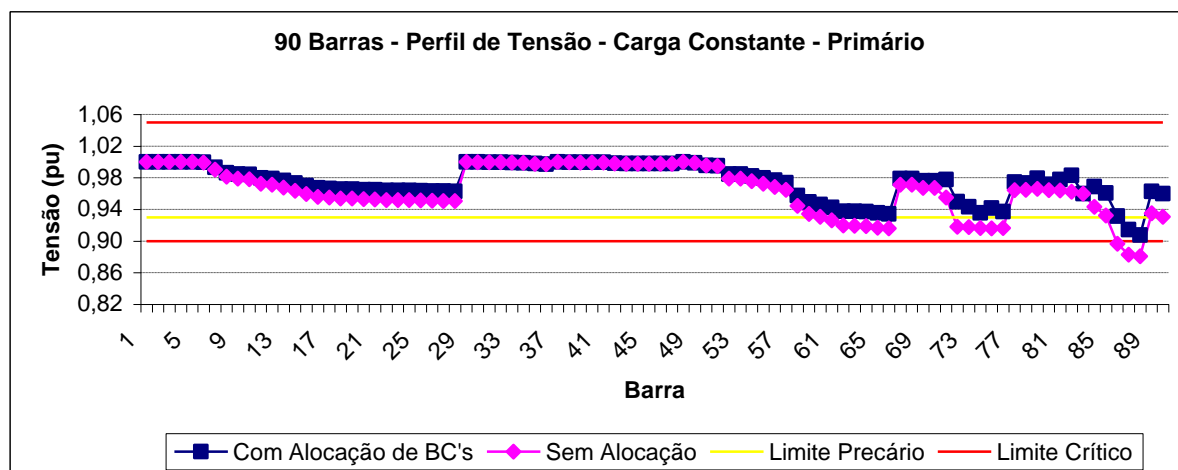


FIGURA 5.10 – PERFIL DE TENSÃO PARA CARGA COSNTANTE, PRIMÁRIO

5.4.2 Sistema 90 Barras, Carga Constante, Rede Secundária

Nesta simulação, com alocação BCs no secundário, apresentou-se melhora nas magnitudes de tensões nas barras, mas não foi suficiente para eliminar as restrições de violação de tensão. Os resultados estão apresentados nas tabelas 5.38 a 5.41. A Figura 5.11 apresenta o perfil de tensão obtido.

TABELA 5.38 – PARÂMETROS P/ ALOCAÇÃO DE BCS SECUNDÁRIO

CONDIÇÕES DE PROGRAMA			
Nº Bits	Melhor Tempo	Nº de Gerações	Melhor Geração
152	833'51"	10.000	4029

TABELA 5.39 – ALOCAÇÕES DOS BCS SECUNDÁRIO

ALOCAÇÃO		
BARRA	POTÊNCIA (kvar)	CUSTO (\$)
85	10	752,00
90	20	929,00
76	10	752,00
72	20	929,00
87	20	929,00
77	20	929,00
78	20	929,00
84	20	929,00
86	20	929,00
73	20	929,00
71	10	752,00
80	10	752,00
81	10	752,00
79	20	929,00
82	10	752,00
74	20	929,00
89	20	929,00
88	20	929,00
75	20	929,00
Total	320	16589,00

TABELA 5.40 – RETORNOS FINANCEIROS

CP (\$)	CVt (\$)	Cac (\$)	VPL (\$)
18953,00	0	16692,00	191710,00

TABELA 5.41 – ÍNDICES DE RETORNO FINANCEIRO

ÍNDICES ECONÔMICOS	
TIR (%)	TR [anos]
214,05	1,3637

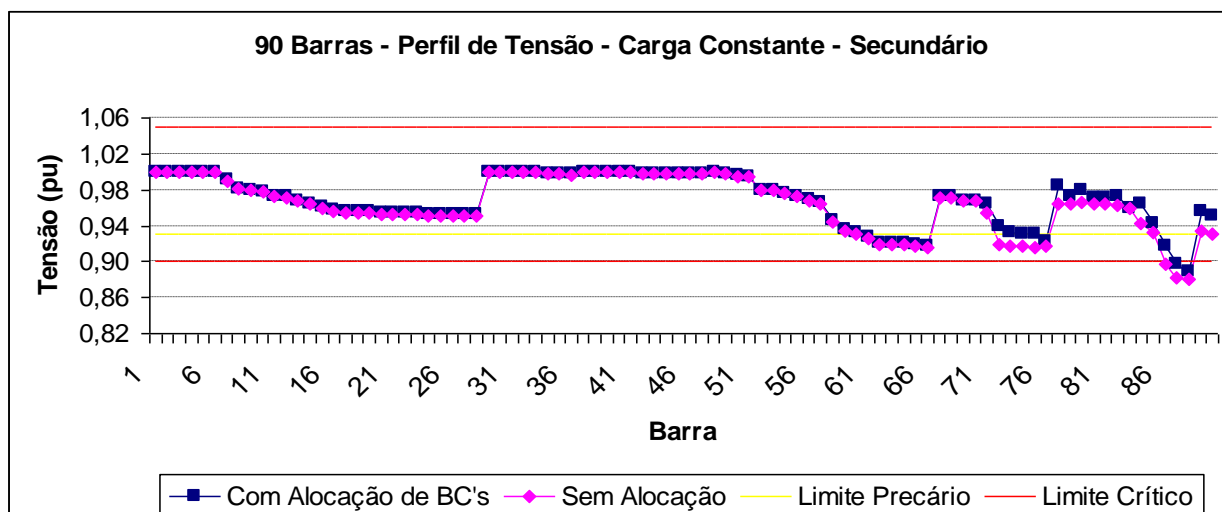


FIGURA 5.11 – PERFIL DE TENSÃO PARA CARGA COSNTANTE, SECUNDÁRIO

5.4.3 Sistema 90 Barras, Carga Constante, Mista

Com relação violação de tensão, o sistema passou de condição crítica para condição precária de tensão. Entretanto com relação a alocação somente no primário, a alocação mista teve melhor desempenho, sendo o VPL 2% maior e tempo de retorno menor. Os resultados estão apresentados nas tabelas 5.42 a 5.45. A Figura 5.12 apresenta o perfil de tensão obtido.

TABELA 5.42 – PARÂMETROS P/ ALOCAÇÃO BCS MISTA

CONDIÇÕES DE PROGRAMA			
N° Bits	Melhor Tempo	N° de Gerações	Melhor Geração
182	649'21"	10.000	8950

TABELA 5.43 – ALOCAÇÕES DOS BCS, MISTO

ALOCAÇÃO		
BARRA	POTÊNCIA (kvar)	CUSTO (\$)
65	600	17950,00
62	900	22120,00
16	600	17950,00
81	20	929,00
80	20	929,00
87	20	929,00
72	20	929,00
89	20	929,00
84	20	929,00
79	20	929,00
77	20	929,00
75	10	752,00
90	20	929,00
78	20	929,00
85	20	929,00
88	20	929,00
76	20	929,00
86	20	929,00
83	20	929,00
74	20	929,00
82	20	929,00
73	20	929,00
Total	3070	75494,00

TABELA 5.44 – RETORNOS FINANCEIROS

CP (\$)	CVt (\$)	Cac (\$)	VPL (\$)
101888,10	709,02	30365,50	737504,25

TABELA 5.45 – ÍNDICES DE RETORNO FINANCEIRO

ÍNDICES ECONÔMICOS	
TIR (%)	TR [anos]
175,867	0,8394

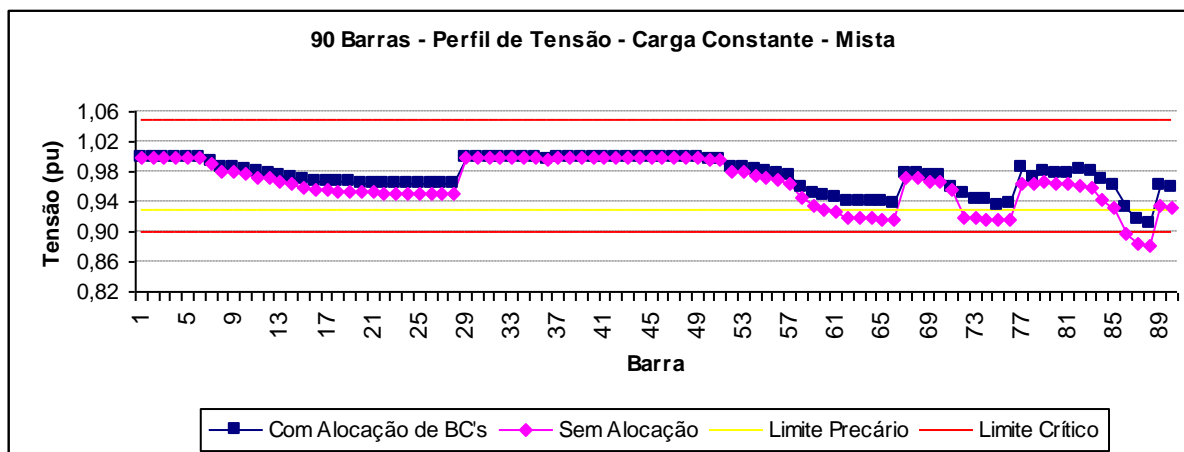


FIGURA 5.12 – PERFIL DE TENSÃO PARA CARGA COSNTANTE, MISTA

5.4.4 Sistema 90 Barras, Patamar de Carga, Rede Primária

A alocação somente no primário resolveu apenas a violação de tensão crítica do sistema passando a ter características precárias após a instalação dos BCs.

Os resultados estão apresentados nas tabelas 5.46 a 5.49. A Figura 5.13 apresenta o perfil de tensão obtido. Os demais gráficos estão disponíveis no Apêndice D, devido a sua quantidade e para facilidade de compreensão do leitor.

TABELA 5.46 – PARÂMETRO P/ ALOCAÇÃO DE BCS PRIMÁRIO

CONDIÇÕES DE PROGRAMA			
Nº Bits	Melhor Tempo	Nº de Gerações	Melhor Geração
33	1043'31"	10.000	782

TABELA 5.47 – ALOCAÇÕES DOS BCS PRIMÁRIO

ALOCAÇÃO		
BARRA	POTÊNCIA (kvar)	CUSTO (\$)
62	1200	24100,00
20	600	17950,00
65	300	15970,00
Total	2100	

TABELA 5.48 – RETORNOS FINANCEIROS

CP (\$)	CVt	Cac (\$)	VPL (\$)
98912,26	1951,49	9099,30	625919,58

TABELA 5.49 – ÍNDICES DE RETORNO FINANCEIRO

ÍNDICES ECONÔMICOS	
TIR (%)	TR [anos]
189,52	0,5436

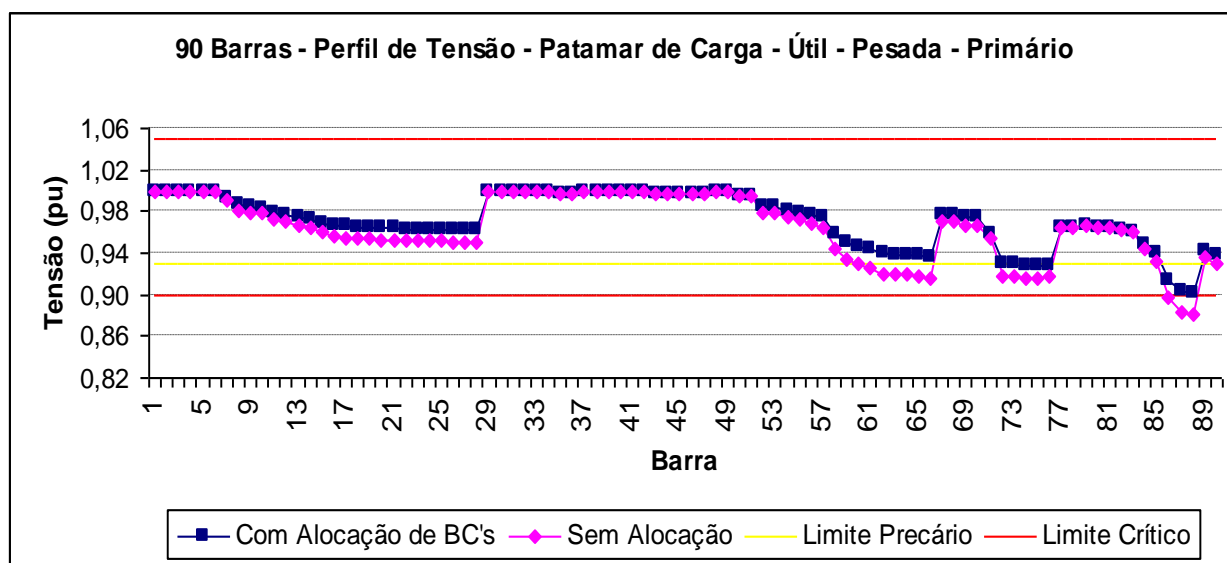


FIGURA 5.13 – PERFIL DE TENSÃO PARA PATAMAR DE CARGA DIA ÚTIL, PESADA, PRIMÁRIO

5.4.5 Sistema 90 Barras, Patamar de Carga, Rede Secundária

A alocação do BCs somente no secundário melhoram um pouco o perfil de tensão, mas não o suficiente para livrar nenhum patamar de carga das violações de tensão.

Os resultados estão apresentados nas tabelas 5.50 a 5.53. A Figura 5.13 apresenta o perfil de tensão obtido. Os demais gráficos estão disponíveis no Apêndice D, devido a sua quantidade e para facilidade de compreensão do leitor.

TABELA 5.50 – PARÂMETRO P/ ALOCAÇÃO DE BCS NO SECUNDÁRIO

CONDIÇÕES DE PROGRAMA			
Nº Bits	Melhor Tempo	Nº de Gerações	Melhor Geração
152	733'17"	10.000	409

TABELA 5.51 – ALOCAÇÕES DOS BCS DO SECUNDÁRIO

ALOCAÇÃO		
BARRA	POTÊNCIA (kvar)	CUSTO (\$)
89	20	929,00
82	15	815,00
79	10	752,00
85	15	815,00
83	20	929,00
76	15	815,00
84	20	929,00
86	20	929,00
72	20	929,00
74	20	929,00
78	5	678,00
81	20	929,00
71	20	929,00
87	20	929,00
80	15	815,00
75	15	815,00
88	20	929,00
73	20	929,00
90	10	752,00
Total	320	16476,00

TABELA 5.52 – RETORNOS FENANCEIROS

CP (\$)	CVt (\$)	Cac (\$)	VPL (\$)
19032,61	0	13343,60	171700,92

TABELA 5.53 – ÍNDICES DE RETORNO FENANCEIRO

ÍNDICES ECONÔMICOS	
TIR (%)	TR [anos]
195,6352	1,4791

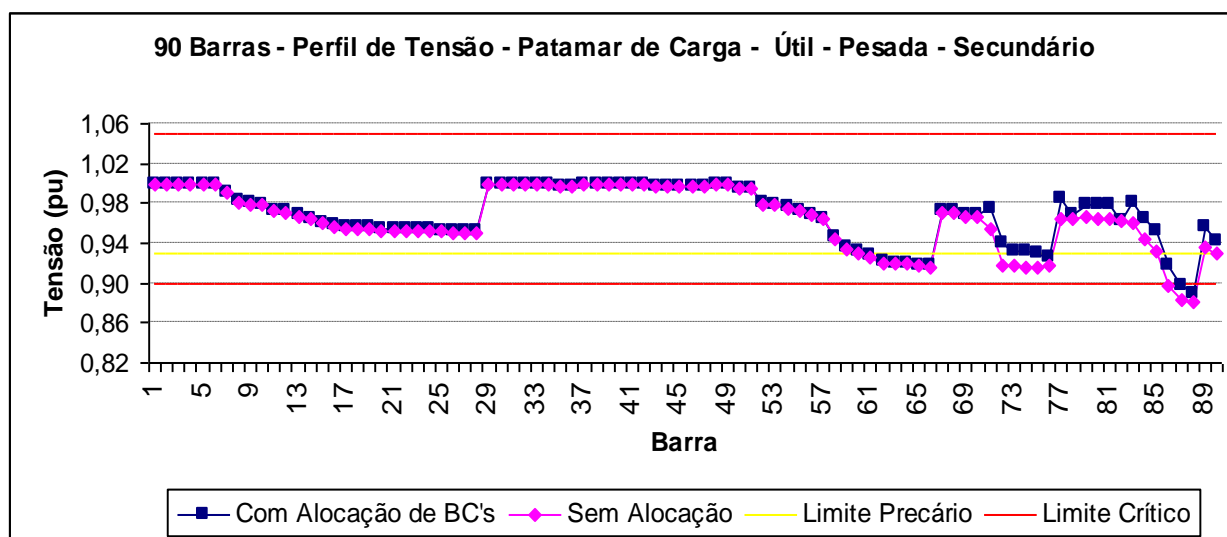


FIGURA 5.14 – PERFIL DE TENSÃO PARA PATAMAR DE CARGA DIA ÚTIL, PESADA, SECUNDÁRIO

5.4.6 Sistema 90 Barras, Patamar de Carga, Mista

Para alocação mista, obteve-se praticamente o mesmo resultado da alocação do primário, livrando o sistema de condição crítica para carga pesada para precária com o diferencial de sempre as magnitudes de tensões nas barras serem maiores. O VPL foi 14,57% maior, embora seu tempo de retorno fosse maior. O aumento de consumo nas barras do secundário foi de 162,72% maior que no primário e teve uma redução de perdas de 5% no faturamento final.

Os resultados estão apresentados nas tabelas 5.54 a 5.57. A Figura 5.13 apresenta o perfil de tensão obtido. Os demais gráficos estão disponíveis no Apêndice D, devido a sua quantidade e facilidade de compreensão do leitor.

TABELA 5.54 – CONDIÇÕES PARÂMETRO P/ ALOCAÇÃO DE BCS MISTO

CONDIÇÕES DE PROGRAMA			
Nº Bits	Melhor Tempo	Nº de Gerações	Melhor Geração
185	7710'32"	10.000	4319

TABELA 5.55 – ALOCAÇÕES DOS BCS MISTOS

ALOCÇÃO		
BARRA	POTÊNCIA (kvar)	CUSTO (\$)
62	1200	24100,00
18	600	17950,00
65	600	17950,00
85	10	752,00
81	20	929,00
83	10	752,00
73	20	929,00
90	20	929,00
86	20	929,00
80	20	929,00
74	20	929,00
78	20	929,00
87	20	929,00
75	20	929,00
84	10	752,00
71	10	752,00
72	10	752,00
76	20	929,00
89	20	929,00
77	20	929,00
82	20	929,00
79	20	929,00
Total	2730	76766,00

TABELA 5.56 – RETORNOS FINANCEIROS

CP (\$)	CVt (\$)	Cac (\$)	VPL (\$)
103949,267	1951,4931	23905,76	717169,0921

TABELA 5.57 – ÍNDICES DE RETORNO FINANCEIRO

ÍNDICES ECONÔMICOS	
TIR (%)	TR [anos]
168,8292	0,8577

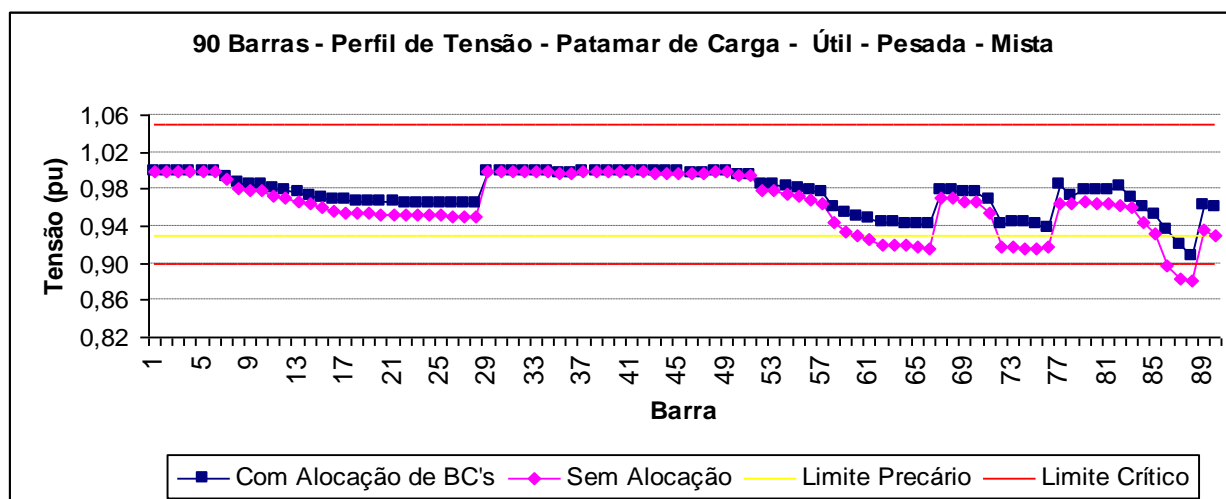


FIGURA 5.15 – PERFIL DE TENSÃO PARA PATAMAR DE CARGA DIA ÚTIL ,PESADA, MISTA

A Tabela 5.58 sintetiza todos os resultados das simulações do sistema de 90 barras. Observa-se, pela análise da TIR que a alocação mista apresenta uma TIR menor que a alocação exclusiva na primária, bem como inferior à alocação exclusiva na secundária. Isso pode ter ocorrido pelo fato dos AGs não terem convergido para um ótimo global, uma vez que a solução de alocação dos BCs na rede primária, na simulação mista, não foi semelhante à alocação dos BCs na rede primária, na alocação exclusiva primária.

TABELA 5.58 – QUADRO GERAL DE RESULTADOS DO SISTEMA 90 BARRAS

Sis	(kvar)	CI (\$)	CP (\$)	CVt (\$)	Cac (\$)	TIR (%)	TR (anos)	VPL (\$)
Pri	2100	58.020,00	98.912,26	1.951,49	9.099,30	189,52	0,5436	625.919,58
Sec	320	16.476,00	19.032,61	0	13.343,60	195,63	1,3513	171.700,92
Mista	2730	76.766,00	103.949,26	1.951,49	23.905,76	168,82	0,8577	717.169,09

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para o sistema de 16 barras os resultados foram excelentes, pois conseguiu-se reduzir a compra de um BC do primário de 1200 kvar por 100 kvar, somados os cinco capacitores 20 kvar cada do secundário. Em todos os casos, carga constante e patamar de carga os BCs no secundário mostraram bons desempenhos.

Para o sistema de 90 barras os resultados também foram surpreendentes para o caso mais completo (simulação – patamar de carga – mista) o VPL ficou acima dos 14% com relação ao primário, o aumento de consumo ficou aproximadamente de 163% e a redução de perdas em torno de 5%. Como já mencionado acima o desempenho dos BCs do secundário tiveram bons desempenhos.

6 CONCLUSÕES

6.1 CONCLUSÕES

É de fundamental importância para uma boa alocação de BCs saber escolher qual a melhor tecnologia empregada, o tipo (primário ou secundário) e suas características.

Os AGs comportaram-se de maneira robusta e eficiente para busca da solução. Embora seu desempenho fique comprometido devido ao número variável de BCs no secundário, contribuindo para o aumento do esforço computacional e conseqüentemente maior tempo de busca da solução.

A metodologia proposta apresenta condições distintas para alocação de BCs, tendo como opção de alocação somente no primário, somente no secundário ou mista. A mesma considerou problemas clássicos como: redução das perdas ativas, redução dos custos de capacitores e como pontos inovadores o aumento de consumo nas barras do secundário e violações de tensão.

A técnica de análise de viabilidade econômica baseada no VPL expressou o quanto é pertinente a alocação de BCs no secundário, pois possibilita comparar equipamentos com topologias e preços de kvar diferentes e seus retornos.

Para BCs primário, as metodologias existentes estão bem consolidadas e difundidas. Levando-se em consideração que o desempenho dos BCs visa racionalizar o uso do reativo, as concessionárias de energia fazem alocação dos mesmos via agrupamento, ou seja instalam BCs do primário em um ponto “ótimo” no sistema para obter seu melhor desempenho (custo/benefício). No entanto os BCs no secundário apropriam-se das técnicas de instalação (critérios) de melhor forma, são instalados mais próximos a carga tendo assim melhor desempenho em uma análise técnico-econômica. Este desempenho aliado a metodologia de alocação do primário (mista) é extremamente interessante, pois além de melhorar as magnitudes de tensões nas barras e fortalecer o aumento de tensão oferecem um retorno quase imediato de investimento.

Analisando-se os resultados das simulações conclui-se que alocação de BCs no secundário é uma opção extremamente interessante e viável, não individualmente, mas sim concomitantemente com os bancos no primário.

6.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Sugerem-se como trabalhos futuros:

- a. Inserir critério de otimização contemplando as correntes de *inrush* (BEÊ, 2007);
- b. Implementar e testar outras técnicas de inteligência artificial ao invés dos AGs;
- c. Inserir critério de otimização contemplando as quedas de tensão no alimentador primário de distribuição (BEÊ, 2007);
- d. Analisar a influência das correntes harmônicas para alocação dos BCs nos circuitos primário e secundário de distribuição;
- e. Desenvolver metodologia para alocação simultânea de BCs nos circuitos primário e secundário de distribuição em conjunto com reguladores de tensão (SZUVOVIVSKI, 2008).
- f. Desenvolver metodologia para alocação simultânea de BCs nos circuitos primário e secundário de distribuição em conjunto com geração distribuída.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA; 2001. *Disposições Relativas à Conformidade dos Níveis de Tensão de Energia Elétrica em Regime Permanente*, Resolução ANEEL N° 505. Brasília.
- BALA, J.L., JR. KUNTZ, P.A. PEBLES, M.J; January, 1997. Optimal Capacitor Allocation using a Distribution-Analyzer-Recorder. *IEEE Transactions on Power Delivery*, voll. 12, no. 1, PP.464-469
- BARAN, M. E. E.; WU, F.F.; 1989. Optiical Capacitor Placement on Radial Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.4 No. 1, p. 725-734.
- BEASLEY, D.; BULL, D.R. and MARTIN, R.R.; 1992. An Overview of Genetic Algorithms: Part1, Fundamentals. Technical Report 15(2), University of Cardiff.
- BEASLEY, D.; BULL, D.R. and MARTIN, R.R.; 1993. An Overview of Genetic Algorithms: Part 2, Research Topics. Technical Report 15((4), University of Cardiff.
- BEÊ, Rafael, T.; 2007. Alocação de Bancos de Capacitores em Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Algoritmos Genéticos. Dissertação de Mestrado. Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.
- BROADWATER, R.P.; CHANDRASEKARAM, A.; HUDDLESTON, C.T. AND KHAN, A.H.; 1988. Power Flow Analysis of Unabalanced Multiphase Radial Distribution systems. *Electric Power System Reserarch*, vol. 14.
- CHEN, T.H.; CHEN, M.S.; ET AL .; 1991. Distribution System Power Flow Analysis – A Rigid Approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6 no 3, no. 3, PP. 1146-1152.
- COELHO, L. S.; 2003. Fundamentos, Potencialidades e Aplicações de Algoritmos Evolutivos. *Notas em Matemática Aplicada*, Sociedade Brasileira de Mátemática aplicada e Computacional, são Carlos.
- COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA ELÉTRICA; 1992. *Recomendações Básicas para a Aplicação de Bancos de Capacitores em Alimentadores*. Curitiba.
- COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA ELÉTRICA; 1996a. *Banco de Capacitores*, MIT 161301. Curitiba.

- DE OLIVEIRA GALVÃO, c. E VALENÇA, M.J.S.; 1999. “Sistemas Inteligentes – Aplicações a Recursos Hídricos E Ciências Ambientais”, volume 1. ABRH – Editora da Universidade – UFRGS, Porto Alegre – RS.
- DELFANTI, Maurizio; GRANELLI, Gianpietro; MARANNIN, Paolo; MONTAGNA, Marco; 2000. Optimal Capacitor Placement Using Deterministic and Genetic Algorithms. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 15, n. 3 (Aug), p. 1041-1046.
- ELEKTRO, P&D Ciclo 2002/2003: Metodologia para Otimização do Desempenho da Rede. Relatório 7, p7-8, 2005.
- GALLEGO, R.A.; MONTICELLI, A.J. & ROMERO, R.; November, 2001. Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.16, nº4.
- GOLDBERG, D.E.; 1997. “Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning”. John Wiley & Sons, United States of America.
- HAUPT,R.L and HAUPT, S.E.; 1998. “Practical Genetic Algorithms”, volume 1. Wiley-Interscience – John Wiley Sons.
- HOLLAND, J.H.; 1992. “Adaptation in Natural and Artificial Systems”, volume 1. Bradford Books; Reprint Edition.
- IEEE Std 342-1973 / ANSI C. 37.0731-1973, May 23, 1973. “Application Guide for Capacitance Current Switching for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis”. American National Standart.
- MENDES, A.; PISSARA, C.; FRANÇA, P.; LYRA, C.; CAVELUCCI, C.; 2001. *Instalação de Capacitores para redução de Perdas em Redes de Distribuição de Energia Elétrica*.
- NATARAJAN,; 2005. *Power System Capacitor*. Boca Raton: CRC Press.
- NG H. N; SALAMA, M. M. A; CHIKHANI, A, Y.; 2000. Classification of Capacitor Allocation Techniques. *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 15, No.1.
- RABELO, P.G and OCHI, L.S.; 1996. Um novo Algoritmo Genético Hídrico para o Problema do Caixeiro Viajante com Grupamento. *Anais do Simpósio Brasileiro de Redes Neurais*, 1:83-90
- REZENDE, S.O.; 2003. “Sistemas Inteligentes – Fundamentos e Aplicações”, volume 1. Manole, Bariri – SP.
- ROSS, A.S.; WESTERFILED, W. R.; JAFFE, F. J.; 1995. Administração Financeira (Corporate Finance). Editora Atlas – São Paulo. p 74 – 96.

- SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H.W.; SEMLYEN, A. AND LUO, G.X.; May, 1988. A Compensation Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 2, PP. 753-762.
- SOUZA, Thales; 2003. Estudo de Planejamento de Reativos em Sistemas Elétricos de Potência. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- SRINIVAS, M.S.; January 2000. Distribution Load Flows: A Brief Review, *Proceedings of the 2000 IEEE PES Summer Meeting*, Singapore.
- SUNDHARARAJAN, S. & PAHWA, A.; 1993. Optimal Selection of Capacitors for Radial Distribution Systems Using a Genetic Algorithms. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9 No. 3, August. PP. 1499-1507.
- SZUVOVIVSKI, ITAMAR; 2008. Alocação Simultânea de Bancos de Capacitores e Reguladores de Tensão em Sistemas de Distribuição usando Algoritmos Genéticos e Fluxo de Potência Ótimo. Dissertação de Mestrado. Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.
- SPEARS, W.M.; JONG, K.A.D.; BACK, T.; FOGEL, D.B. and GARIS, H.; 1993. (editors) *An Overview of Evolutionary Computation*, volume 667.
- WHITLEY, D.; 1993. A Genetic Algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 3 August. Pp. 1499-1507.
- YAMAKAWA, Eduardo, K.; 2007. Sistema de Controle Nebuloso para Bancos de Capacitores Automáticos Aplicados em Alimentadores de Distribuição de Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado. Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

APÊNDICE A – FLUXO DE POTÊNCIA

A.1 O PROBLEMA DO FLUXO DE POTÊNCIA

O problema do fluxo de carga consiste na obtenção das condições de operação, ou seja, magnitude e ângulo das tensões nodais, a partir dos quais podem ser determinados os fluxos de potência ativa e reativa em regime permanente de uma rede de energia elétrica com topologia, níveis de geração e consumo conhecidos.

Na formulação básica do problema de fluxo de potência são associadas quatro variáveis a cada barra, como pode ser verificado na Figura A.1 a qual apresenta duas barras (k e m) de um sistema de distribuição radial.

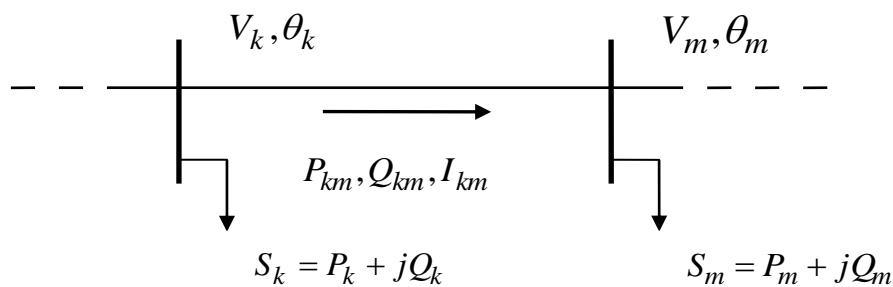


FIGURA A.1 – RAMO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

As quatro variáveis representam:

V_k - módulo da tensão na barra k ;

θ_k - ângulo da tensão da barra k ;

P_k - potência ativa líquida injetada na barra k ;

Q_k - potência reativa líquida injetada na barra k .

Por outro lado, aos ramos da rede, cujas barras extremas são k e m para a Figura A.1, associam-se as seguintes variáveis:

I_{km} - corrente que sai da barra k em direção a barra m ;

P_{km} - fluxo de potência ativa que sai da barra k em direção a barra m ;

Q_{km} - fluxo de potência reativa que sai da barra k em direção a barra m .

No fluxo de carga convencional, definem-se três tipos de barras, em função das variáveis que são conhecidas e incógnitas, conforme mostra a Tabela A.1.

TABELA A.1 – TIPOS DE BARRAS DO FLUXO DE CARGA CONVENCIONAL

Tipo de Barra	Notação	Dados	Incógnitas
Barra de Carga	PQ	P_k e Q_k	V_k e θ_k
Tensão Controlada	PV	P_k e V_k	θ_k e Q_k
Referência	V θ	V_k e θ_k	P_k e Q_k

De modo geral para o sistema de distribuição de energia elétrica, as Barras de Carga – PQ's aparecem em maior número e representam os transformadores nos quais estão conectados as cargas dos sistema elétrico; já as Barras de Tensão Controlada – PV's representam as barras cuja tensão pode ser controlada por intermédio do ajuste do *tap*; e finalmente, a Barra de Referência – V θ representa a subestação – SE e é a única imprescindível na formulação em função de dois fatores (MONTICELLI 1983):

- Necessidade matemática de estipular um ângulo de referência;
- Para fechar o balanço de potência da rede, pois as perdas de distribuição não são conhecidas a priori, ou seja, não é possível definir as injeções de potência do sistema antes de conhecer as perdas que são função dos fluxos na rede.

De acordo com estas definições e como consequência da imposição da Primeira Lei de Kirchhoff para uma barra qualquer do sistema elétrico, tem-se que a potência líquida injetada nesta barra é igual à soma dos fluxos de potência que deixam esta barra, ou seja, têm-se duas equações:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (A.1)$$

$$Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (A.2)$$

sendo:

$$Q_k^{sh} = b_k^{sh} \cdot V_k^2 \quad (A.3)$$

onde:

k - índice de cada barra do sistema;

Ω_k - conjunto de barras ligadas à barra k ;

Q_k^{sh} - potência reativa devido ao elemento *shunt*;

b_k^{sh} - susceptância *shunt* na barra k .

A.2 FLUXO DE POTÊNCIA – MÉTODO DA SOMA DAS CORRENTES

O processo de resolução do fluxo de potência via Método da SDC é iniciado com a determinação do valor da tensão em todas as barras da rede de distribuição, normalmente definida como sendo a tensão da subestação. Após a definição da tensão inicial calculam-se as correntes de carga das barras. Dessa forma, a corrente solicitada pela carga da barra m é:

$$I_m = \frac{S_m^*}{V_m} \quad (\text{A.4})$$

onde:

I_m - corrente solicitada pela carga da barra m ;

S_m - potência da carga da barra m ;

V_m - módulo da tensão na barra m .

Em seguida, entra-se no processo iterativo, iniciando a etapa de *Backward Sweep*.

A.2.1 *Backward Sweep*

O processo *Backward Sweep* consiste na somatória das correntes das cargas para se determinar as correntes dos ramos. Então, começando nas últimas barras de cada ramo e deslocando-se na direção da subestação, calcula-se a corrente em cada ramo da seguinte forma:

$$I_{km} = I_m + \sum_{n \in Cm} I_{nm} \quad (\text{A.5})$$

onde:

Cm - conjunto de barras alimentadas pela barra m .

Uma vez conhecida todas as correntes dos ramos do sistema de distribuição em questão, parte-se para o processo de *Forward Sweep*.

A.2.2 Forward Sweep

Nesta etapa, usando-se os valores das correntes dos ramos e partindo da subestação em direção às últimas barras de cada ramo, calculam-se as tensões das barras da seguinte forma:

$$V_m = V_k - Z_{km} \cdot I_{km} \quad (\text{A.6})$$

onde:

Z_{km} - impedância do ramo km .

Recalculando-se as novas correntes solicitadas pelas cargas das respectivas barras utilizando-se as novas tensões das barras e assim sucessivamente. Esse processo se repete até que algum critério de parada seja satisfeito, como por exemplo, um determinado número de iterações consecutivas seja menor que uma tolerância pré-determinada.

Para este trabalho optou-se por utilizar dois critérios de modo que quando um deles fosse satisfeito o processo iterativo seria interrompido sendo eles: diferença entre as tensões nas barras menor que uma determinada tolerância e número máximo de iterações.

APÊNDICE B – DADOS DO SISTEMA

B.1 SISTEMA DE 16 BARRAS

TABELA B.1 – DADOS DAS CARGAS PARA O SISTEMA DE 16 BARRAS

Barra	P [kW]	Q [kvar]
1	0	0
2	500	218
3	800	349
4	600	262
5	100	44
6	400	174
7	1000	436
8	500	218
9	1200	523
10	600	242
11	300	101
12	24	18
13	24	18
14	24	18
15	36	27
16	60	45
Total	6000	2693

TABELA B.2 – DADOS DAS LINHAS PARA O SISTEMA DE 16 BARRAS

De	Para	R [Ω]	X [Ω]
1	2	0,173	0,2913
2	3	0,435	0,1783
2	4	0,2595	0,43695
4	5	1,74	0,7132
5	6	0,435	0,1783
4	7	0,346	0,5826
7	8	0,435	0,1783
7	9	0,435	0,72825
9	10	0,346	0,5826
10	11	1,305	0,5349

De	Para	R [Ω]	X [Ω]
3	12	124,4	190,44
6	13	124,4	190,44
8	14	124,4	190,44
10	15	74,9	127,8
11	16	39,61	78,2

B.2 SISTEMA DE 90 BARRAS

TABELA B.3 – DADOS DAS CARGAS PARA O SISTEMA DE 90 BARRAS

Barra	P [kW]	Q [kvar]		Barra	P [kW]	Q [kvar]
1	0	0		46	39,22	26,3
2	0	0		47	39,22	26,3
3	0	0		48	0	0
4	0	0		49	79	56,4
5	0	0		50	384,7	274,5
6	0	0		51	384,7	274,5
7	2,6	2,2		52	40,5	28,3
8	40,4	30		53	3,6	7,2
9	75	54		54	4,35	3,5
10	30	22		55	26,4	19
11	28	19		56	24	17,2
12	145	104		57	0	0
13	145	104		58	0	0
14	8	5,5		59	0	0
15	8	5,5		60	100	72
16	0	0		61	0	0
17	45,5	30		62	1244	888
18	60	35		63	32	23
19	60	35		64	0	0
20	0	0		65	227	162
21	1	0,6		66	59	42
22	114	81		67	18	13
23	5,3	3,5		68	18	13
24	0	0		69	28	20
25	28	20		70	28	20
26	0	0		71	24	18
27	14	10		72	24	18

Barra	P [kW]	Q [kvar]		Barra	P [kW]	Q [kvar]
28	14	10		73	36	27
29	26	18,6		74	36	27
30	26	18,6		75	36	27
31	0	0		76	60	45
32	0	0		77	24	18
33	0	0		78	60	45
34	14	10		79	36	27
35	19,5	14		80	36	27
36	6	4		81	36	27
37	26	18,55		82	24	18
38	26	18,55		83	24	18
39	0	0		84	24	18
40	24	17		85	24	18
41	24	17		86	24	18
42	1,2	1		87	36	27
43	0	0		88	60	45
44	6	4,3		89	24	18
45	0	0		90	24	18
Total Geral	4422,19	3203,1				

TABELA B.4 – DADOS DAS LINHAS PARA O SISTEMA DE 90 BARRAS

De	Para	R [Ω]	X [Ω]		De	Para	R [Ω]	X [Ω]
1	2	0,0005	0,0012		46	47	0,0009	0,0012
2	3	0,0005	0,0012		5	48	0,0034	0,0084
3	4	1,00E-10	1,00E-10		48	49	0,0851	0,2083
4	5	0,0015	0,0036		49	50	0,2898	0,7091
5	6	0,0251	0,0294		50	51	0,0822	0,2011
6	7	0,366	0,1864		9	52	0,0928	0,0473
7	8	0,3811	0,1941		52	53	0,3319	0,1114
8	9	0,0922	0,047		10	54	0,174	0,0886
9	10	0,0493	0,0251		54	55	0,203	0,1034
10	11	0,819	0,2707		55	56	0,2842	0,1447
11	12	0,1872	0,0619		56	57	0,2813	0,1433
12	13	0,7114	0,2361		57	58	1,59	0,5337
13	14	1,03	0,34		58	59	0,7837	0,263
14	15	1,044	0,345		59	60	0,3042	0,1006

De	Para	R [Ω]	X [Ω]		De	Para	R [Ω]	X [Ω]
15	16	1,058	0,3496		60	61	0,3861	0,1172
16	17	0,1966	0,065		61	62	0,5075	0,2585
17	18	0,3744	0,1238		62	63	0,0974	0,0496
18	19	0,0047	0,0016		63	64	0,145	0,0738
19	20	0,3276	0,1083		64	65	0,7105	0,3619
20	21	0,2106	0,0696		65	66	1,041	0,5302
21	22	0,3416	0,1129		12	67	0,2012	0,0611
22	23	0,014	0,0046		67	68	0,0047	0,0014
23	24	0,1591	0,0526		13	69	0,7394	0,2444
24	25	0,3463	0,1145		69	70	0,0047	0,0016
25	26	0,7488	0,2475		7	71	124,4	190,44
26	27	0,3089	0,1021		17	72	124,4	190,44
27	28	0,1732	0,0572		20	73	74,9	127,8
3	29	0,0044	0,0108		23	74	74,9	127,8
29	30	0,064	0,1565		25	75	74,9	127,8
30	31	0,3978	0,1315		28	76	39,61	78,2
31	32	0,0702	0,0232		31	77	124,4	190,44
32	33	0,351	0,116		36	78	39,61	78,2
33	34	0,839	0,2816		39	79	74,9	127,8
34	35	1,708	0,5646		42	80	74,9	127,8
35	36	1,474	0,4873		44	81	74,9	127,8
4	37	0,0044	0,0108		47	82	124,4	190,44
37	38	0,064	0,1565		51	83	124,4	190,44
38	39	0,1053	0,123		53	84	124,4	190,44
39	40	0,0304	0,0355		56	85	124,4	190,44
40	41	0,0018	0,0021		59	86	124,4	190,44
41	42	0,7283	0,8509		62	87	74,9	127,8
42	43	0,31	0,3623		66	88	39,61	78,2
43	44	0,041	0,0478		68	89	124,4	190,44
44	45	0,0092	0,0116		70	90	124,4	190,44
45	46	0,1089	0,1373					

APÊNDICE C – GRÁFICOS DE PATAMARES DE CARGA

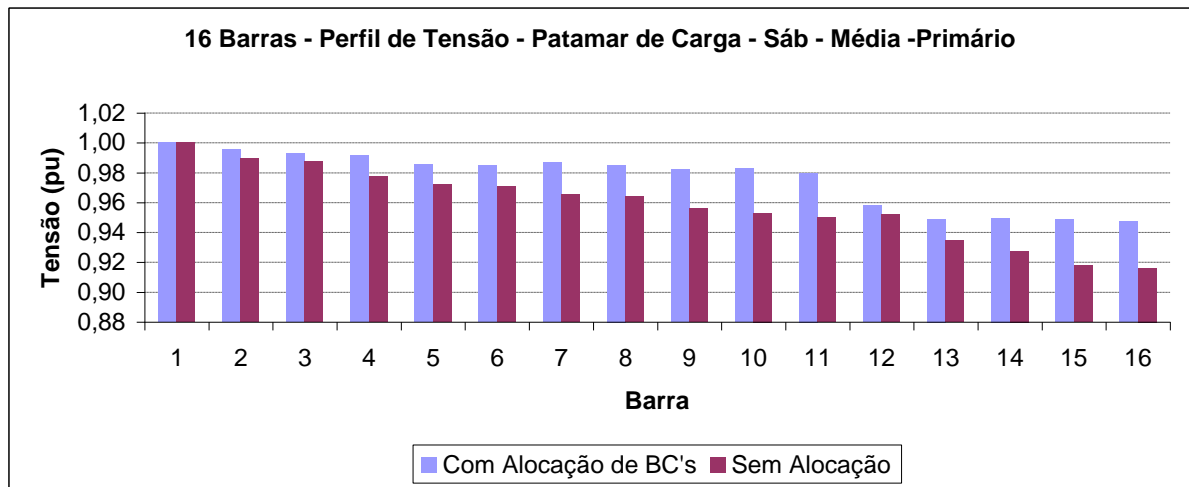


FIGURA C.1 – PERFIL DE TENSÃO – PRIMÁRIO – MÉDIA - SÁBADO

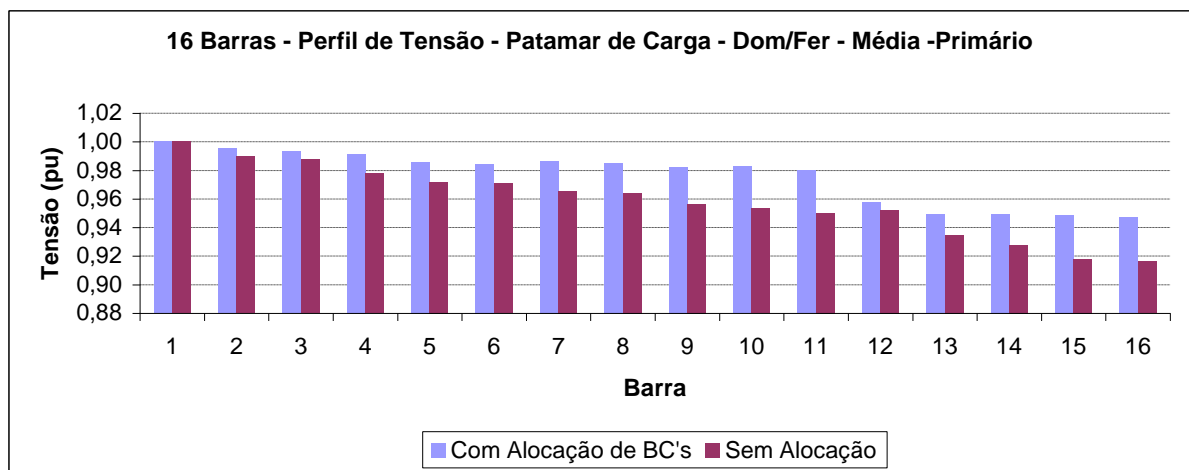


FIGURA C.2 – PERFIL DE TENSÃO – PRIMÁRIO – MÉDIA – DOM/FER

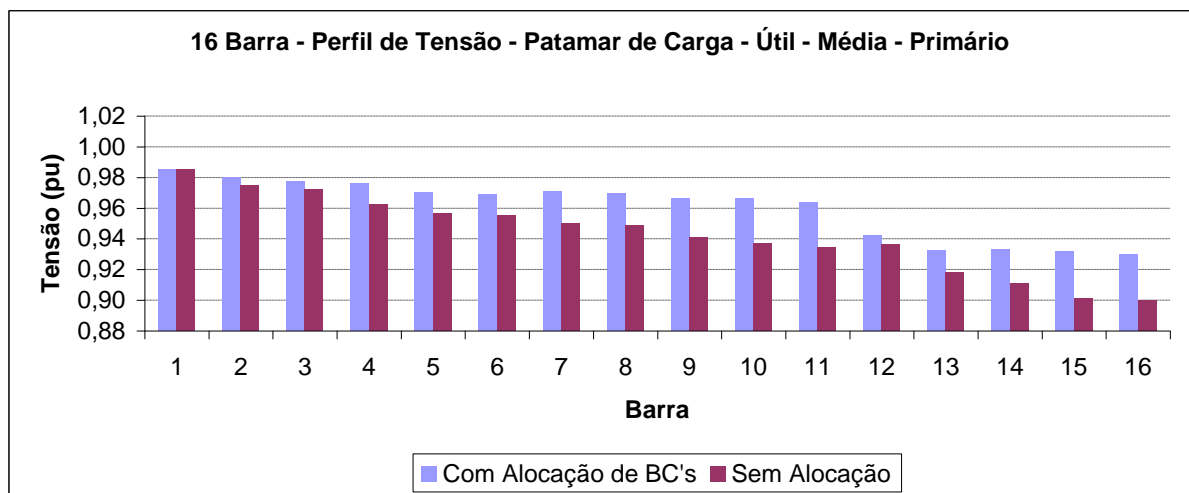


FIGURA C.3 – PERFIL DE TENSÃO – PRIMÁRIO – MÉDIA – ÚTIL

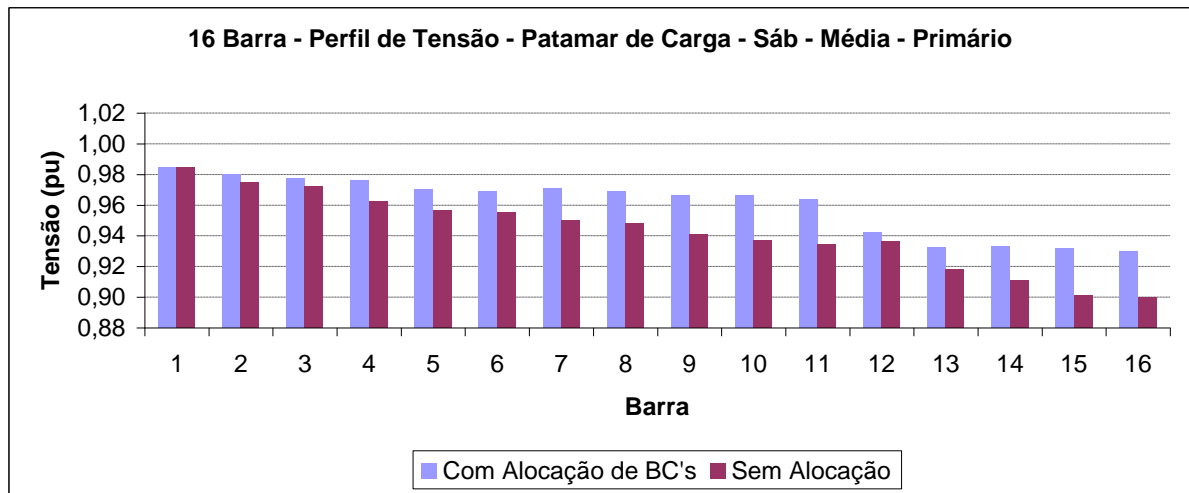


FIGURA C.4 – PERFIL DE TENSÃO – PRIMÁRIO – MÉDIA – SÁBADO

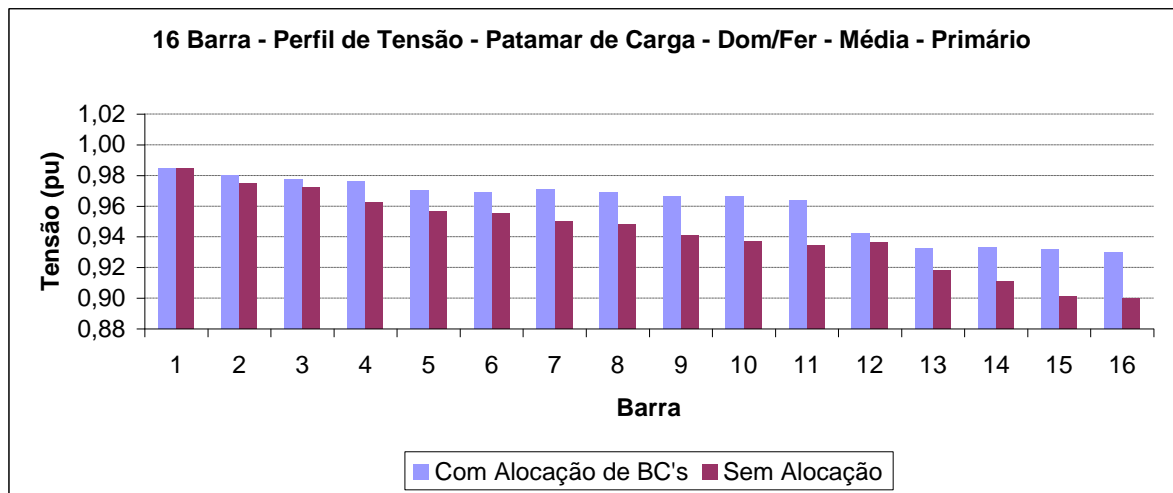


FIGURA C.5 – PERFIL DE TENSÃO – PRIMÁRIO – MÉDIA – DOM/FER

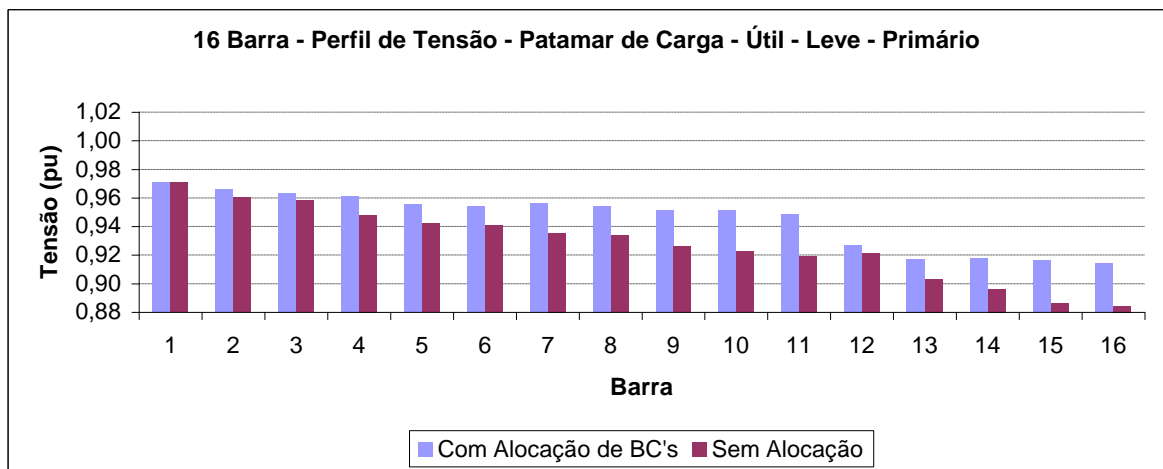


FIGURA C.6 – PERFIL DE TENSÃO – PRIMÁRIO – LEVE – ÚTIL

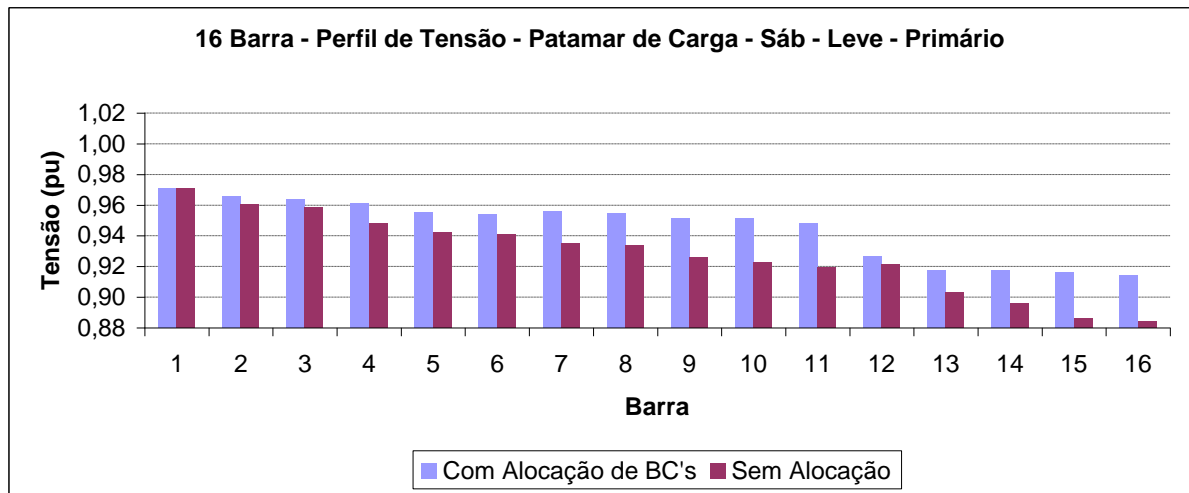


FIGURA C.7 – PERFIL DE TENSÃO – PRIMÁRIO – LEVE – SÁBADO

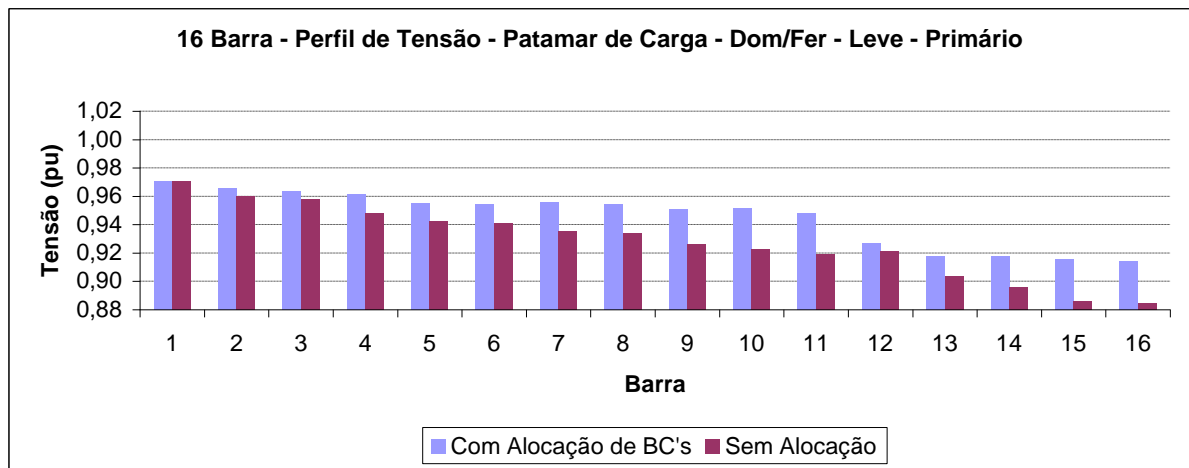


FIGURA C.8 – PERFIL DE TENSÃO – PRIMÁRIO – LEVE – DOM/FER

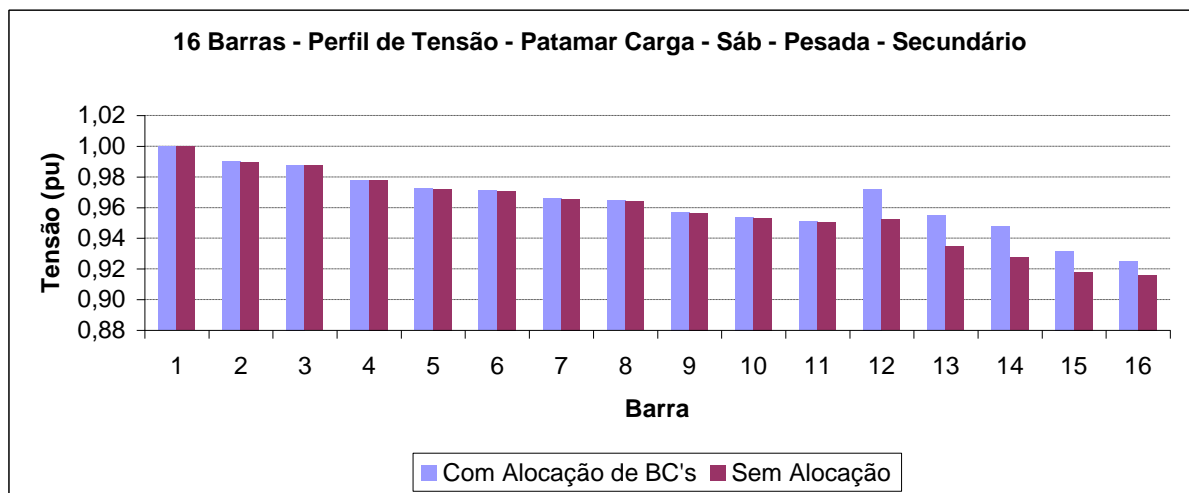


FIGURA C.9 – PERFIL DE TENSÃO – PRIMÁRIO – PESADA – SÁBADO

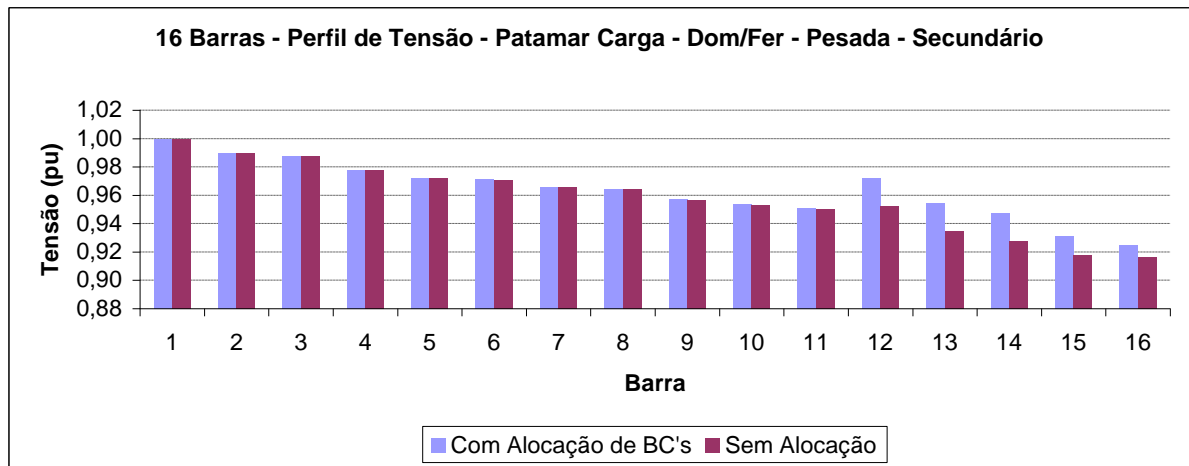


FIGURA C.10 – PERFIL DE TENSÃO – PRIMÁRIO – PESADA – DOM/FER

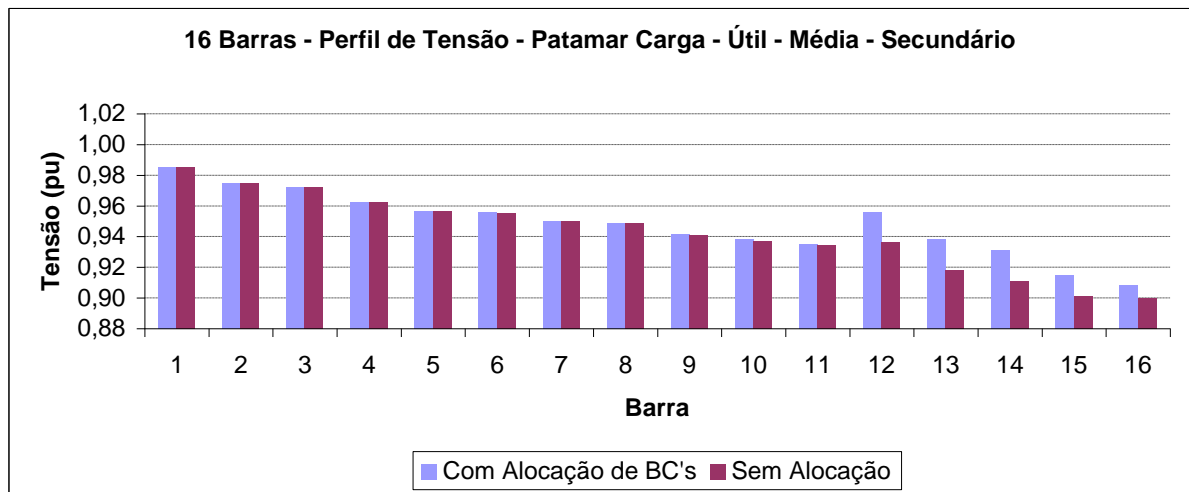


FIGURA C.11 – PERFIL DE TENSÃO – SECUNDÁRIO – MÉDIA – ÚTIL

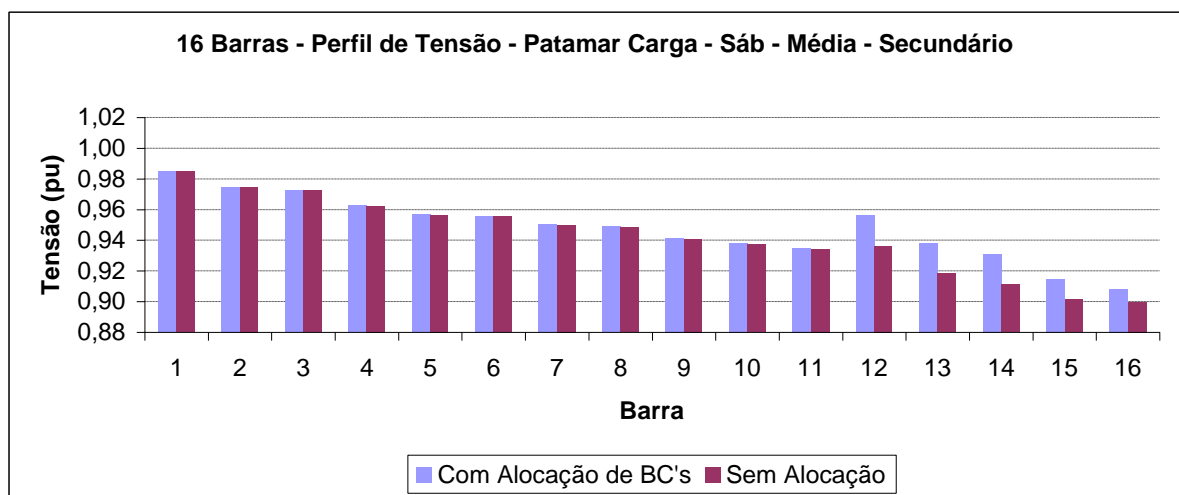


FIGURA C.12 – PERFIL DE TENSÃO – SECUNDÁRIO – MÉDIA – SÁBADO

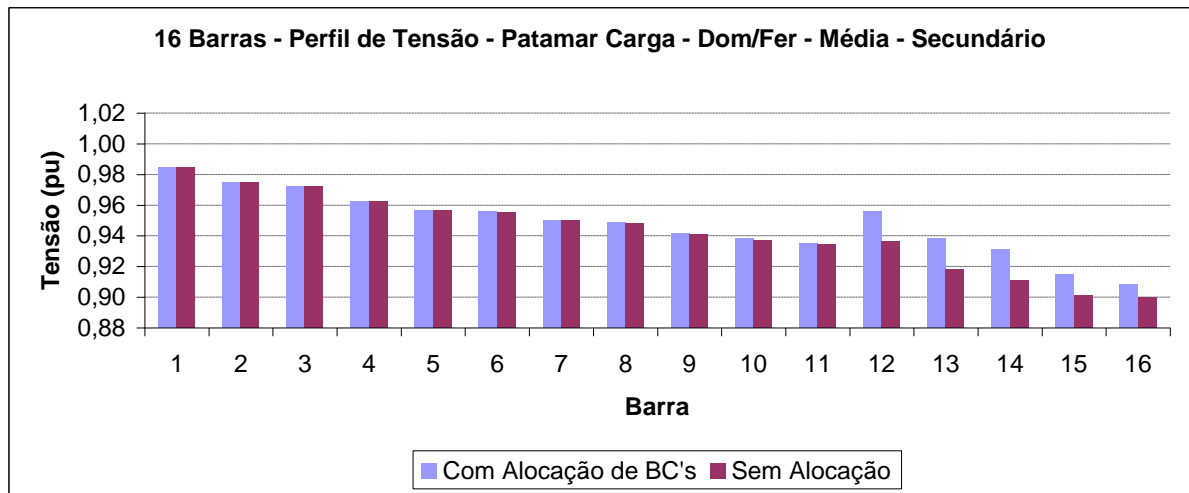


FIGURA C.13 – PERFIL DE TENSÃO – SECUNDÁRIO – MÉDIA – DOM/FER

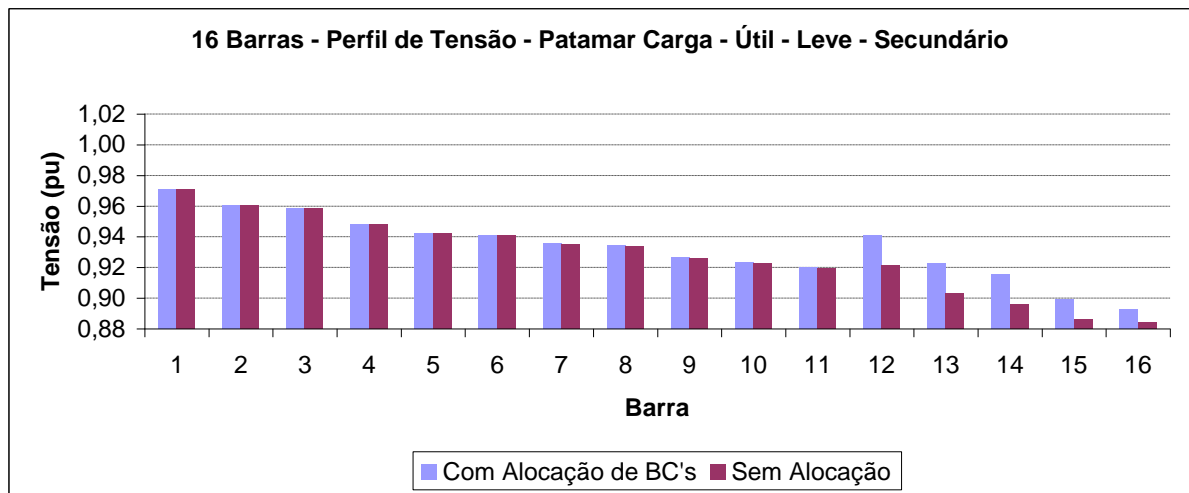


FIGURA C.14 – PERFIL DE TENSÃO – SECUNDÁRIO – LEVE – ÚTIL

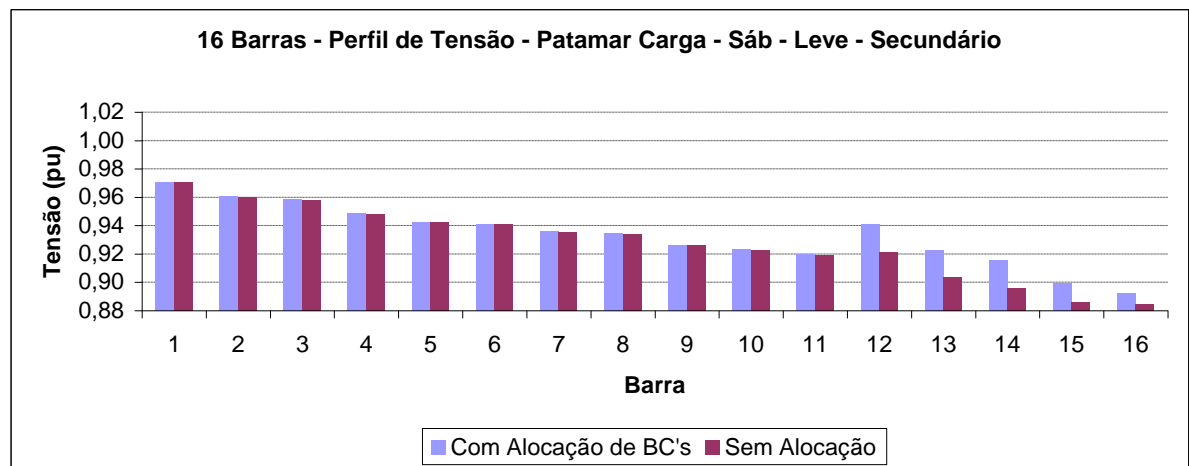


FIGURA C.15 – PERFIL DE TENSÃO – SECUNDÁRIO – LEVE – SÁBADO

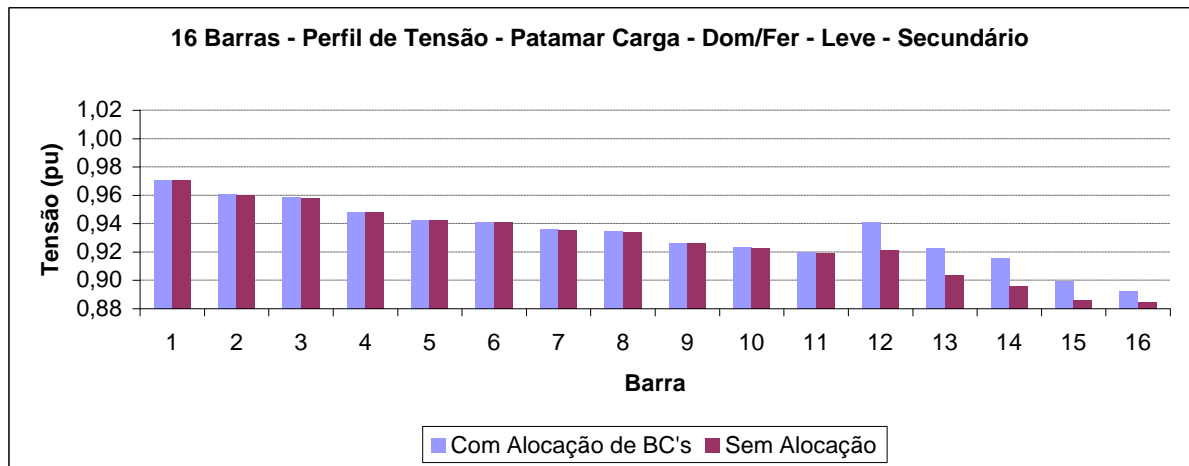


FIGURA C.16 – PERFIL DE TENSÃO – SECUNDÁRIO – LEVE – DOM/FER

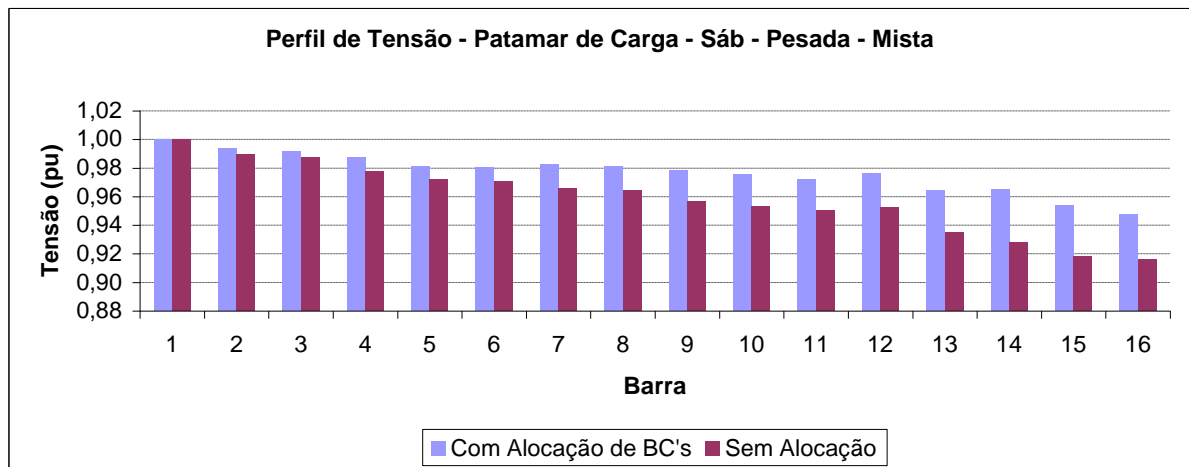


FIGURA C.17 – PERFIL DE TENSÃO – MISTA – PESADA – SÁBADO

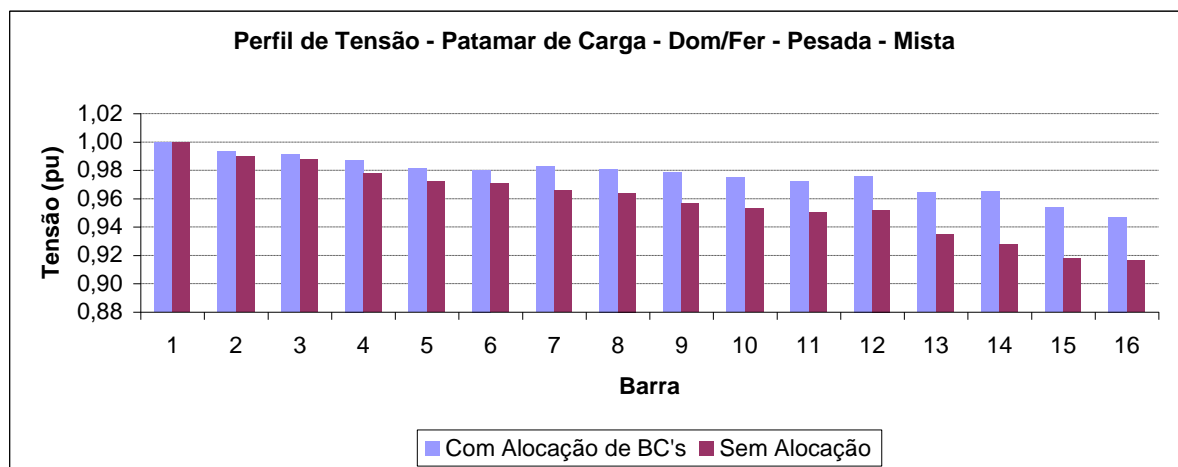


FIGURA C.18 – PERFIL DE TENSÃO – MISTA – PESADA – DOM/FER

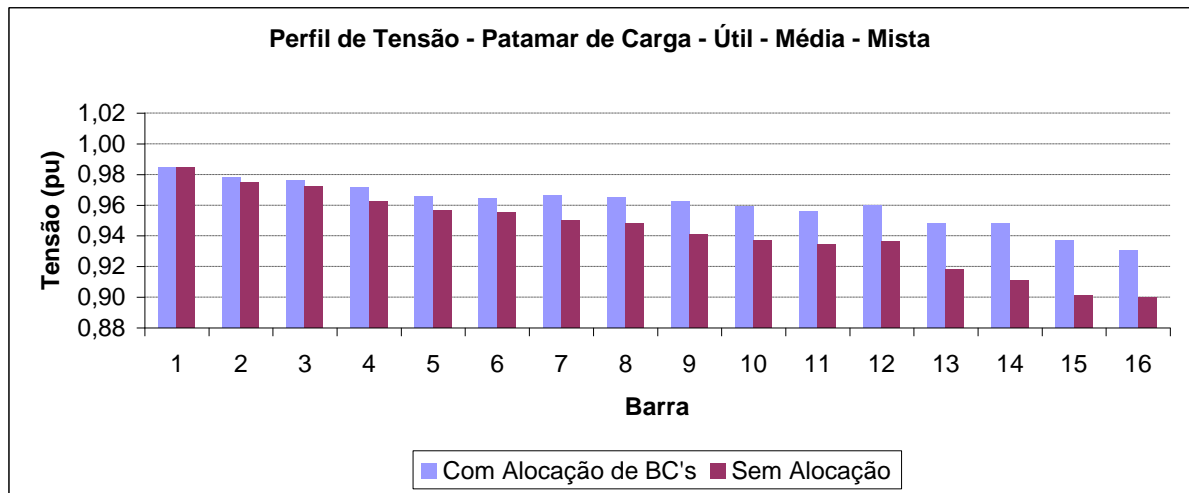


FIGURA C.19 – PERFIL DE TENSÃO – MISTA – MÉDIA – ÚTIL

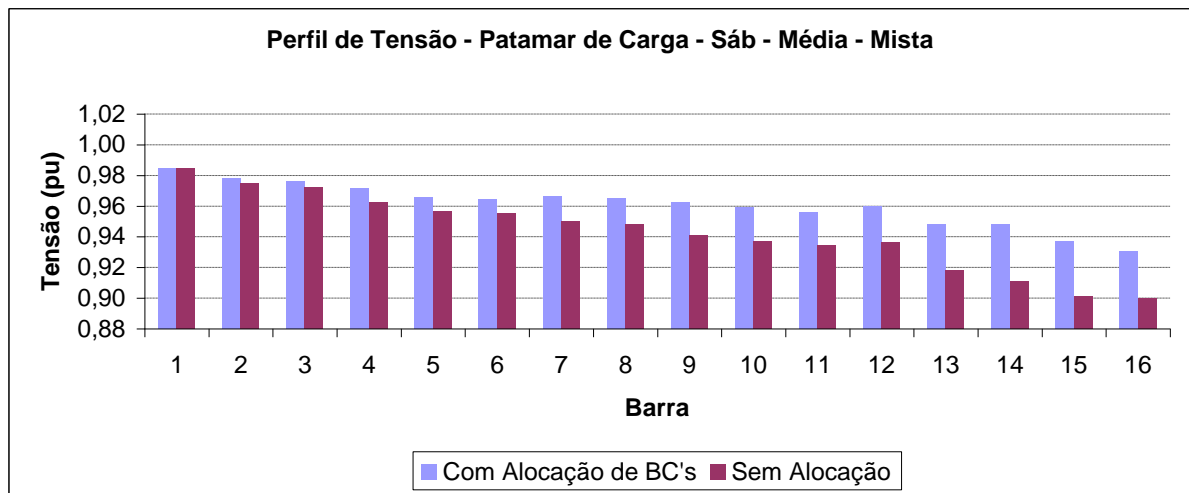


FIGURA C.20 – PERFIL DE TENSÃO – MISTA – MÉDIA – SÁBADO

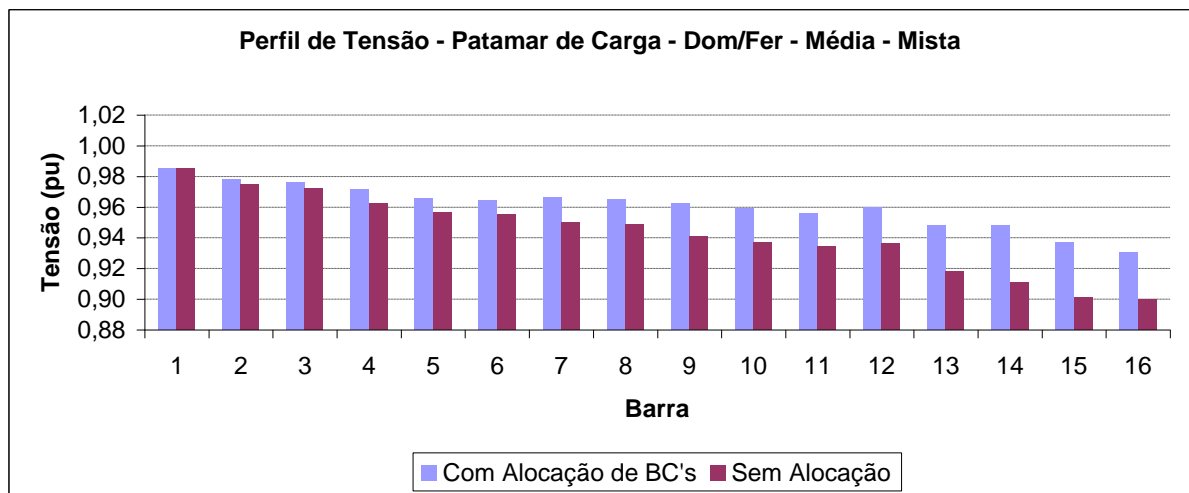


FIGURA C.21 – PERFIL DE TENSÃO – MISTA – MÉDIA – DOM/FER

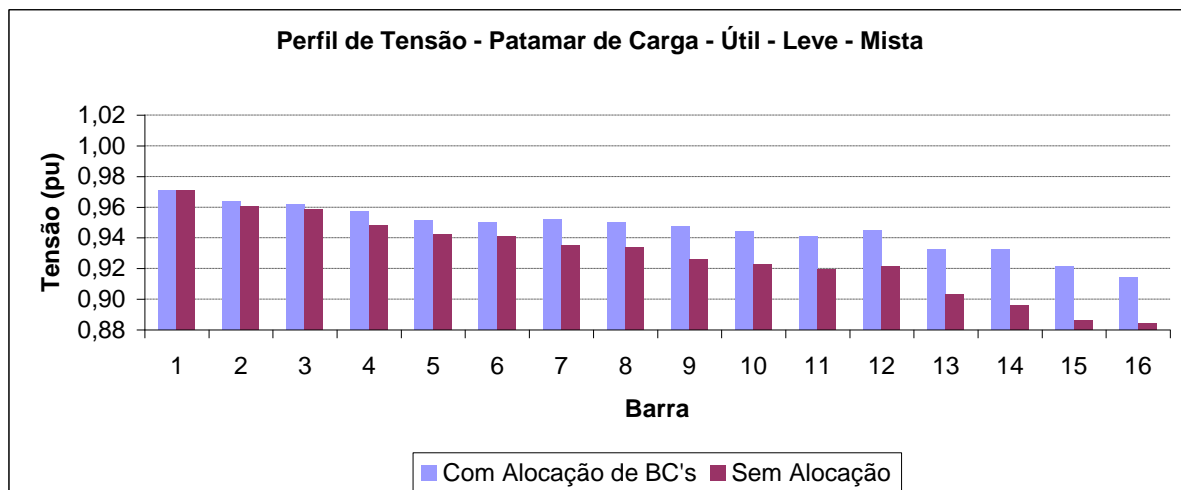


FIGURA C.22 – PERFIL DE TENSÃO – MISTA – LEVE – ÚTIL

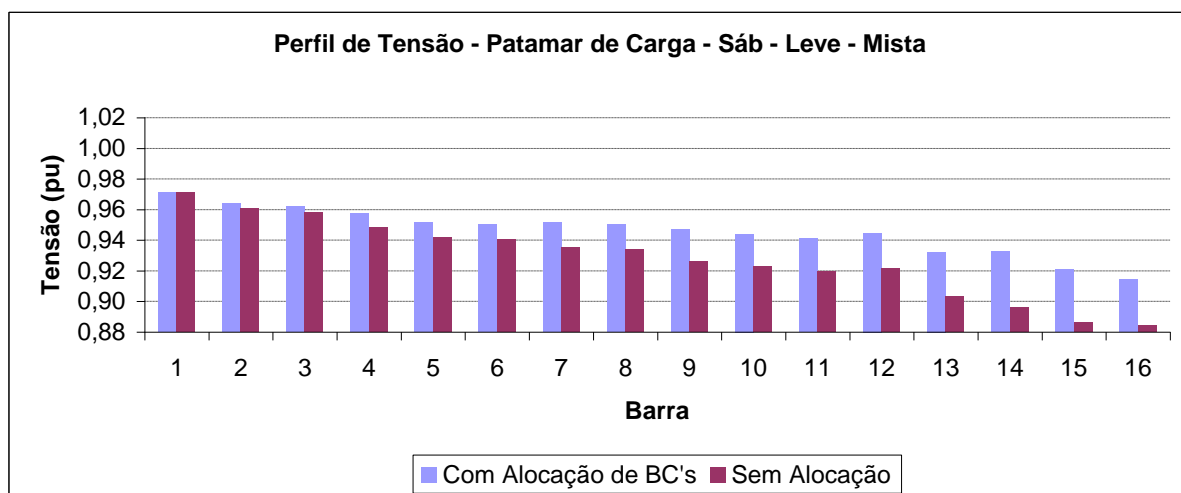


FIGURA C.23 – PERFIL DE TENSÃO – MISTA – LEVE – SÁBADO

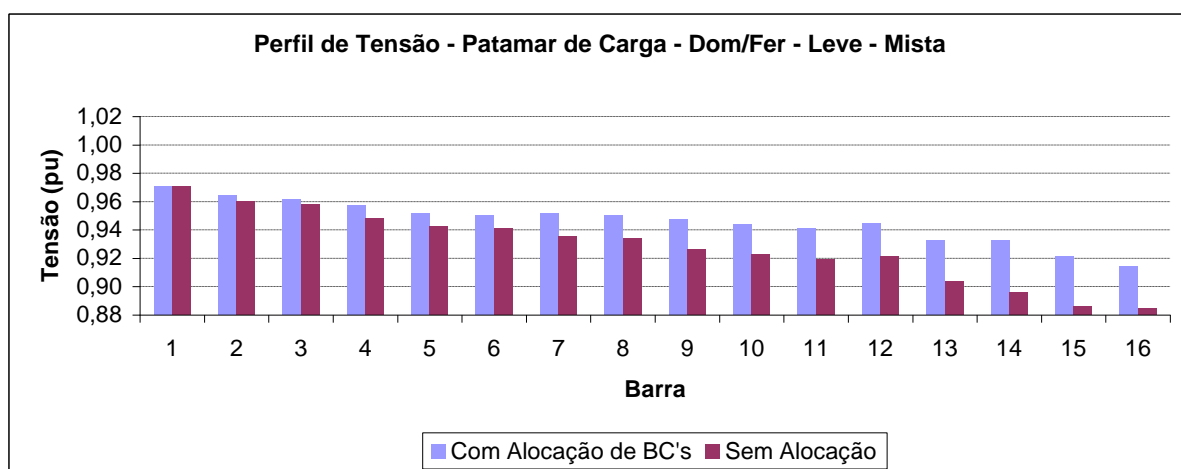


FIGURA C.24 – PERFIL DE TENSÃO – MISTA – LEVE – DOM/FER

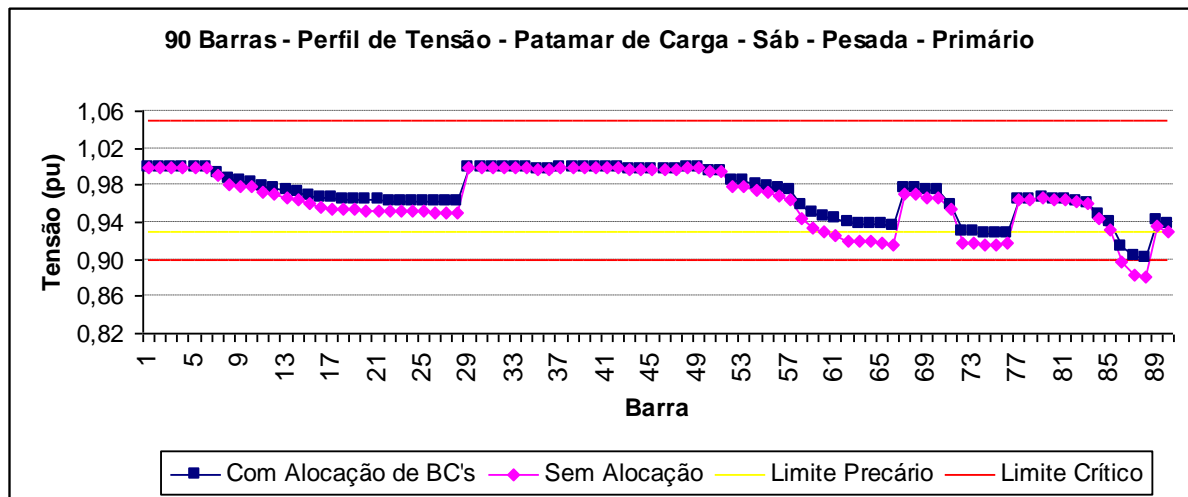


FIGURA C.25 – PERFIL DE TENSÃO – PRIMÁRIO – PESADA – SÁBADO

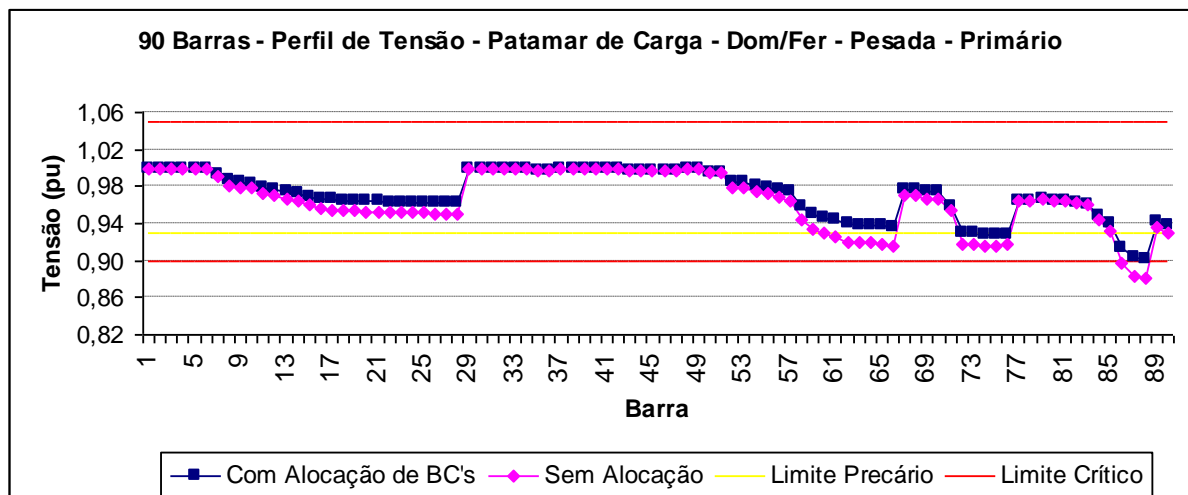


FIGURA C.26 – PERFIL DE TENSÃO – PRIMÁRIO – PESADA – DOM/FER

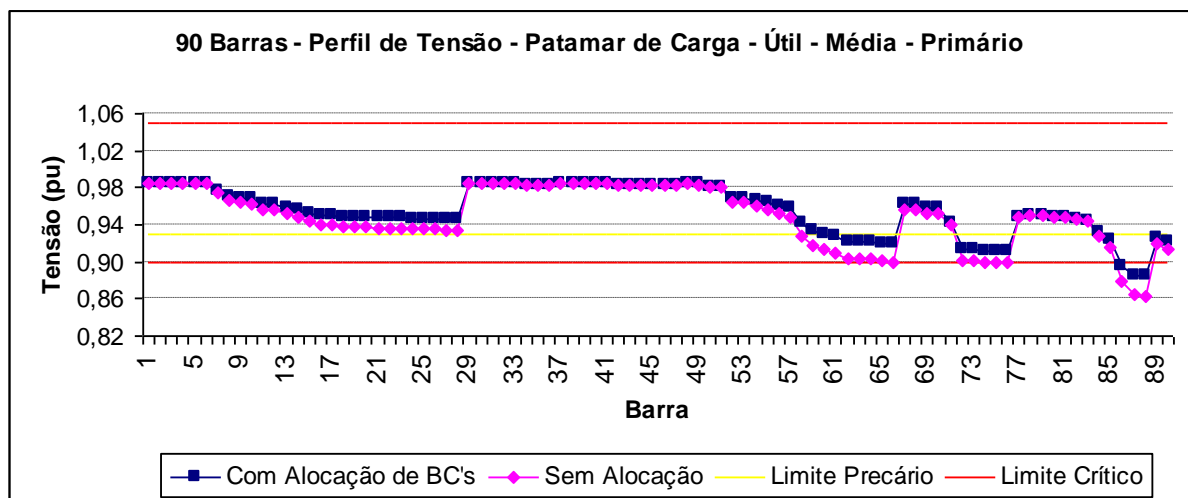


FIGURA C.27 – PERFIL DE TENSÃO – PRIMÁRIO – MÉDIA – ÚTIL

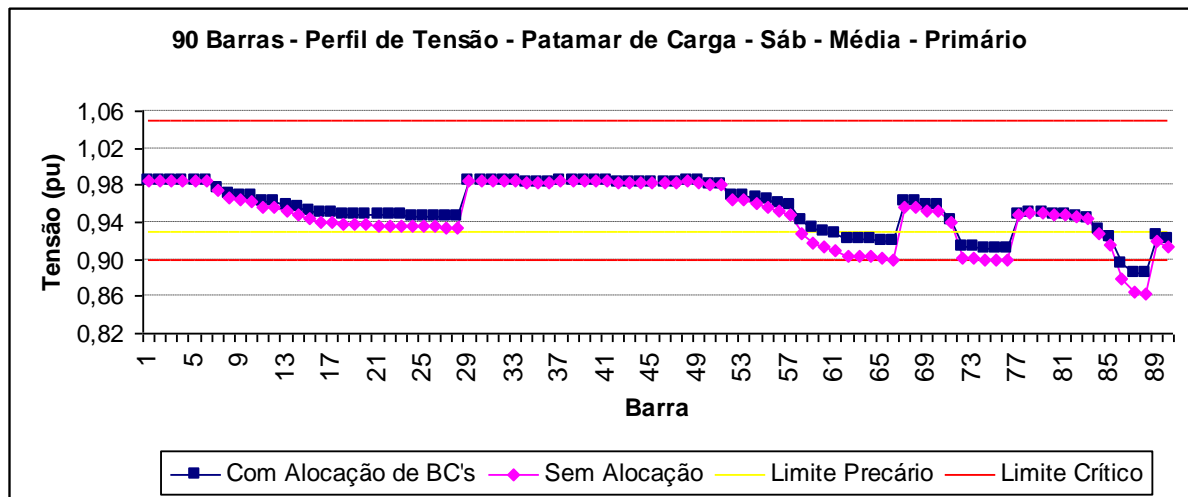


FIGURA C.28 – PERFIL DE TENSÃO – PRIMÁRIO – MÉDIA – SÁBADO

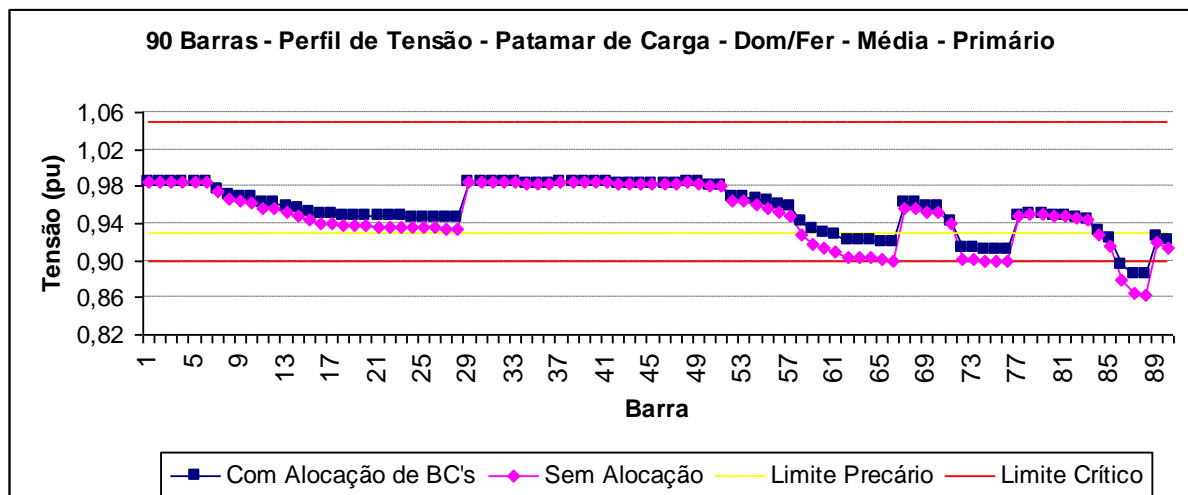


FIGURA C.29 – PERFIL DE TENSÃO – PRIMÁRIO – MÉDIA – DOM/FER

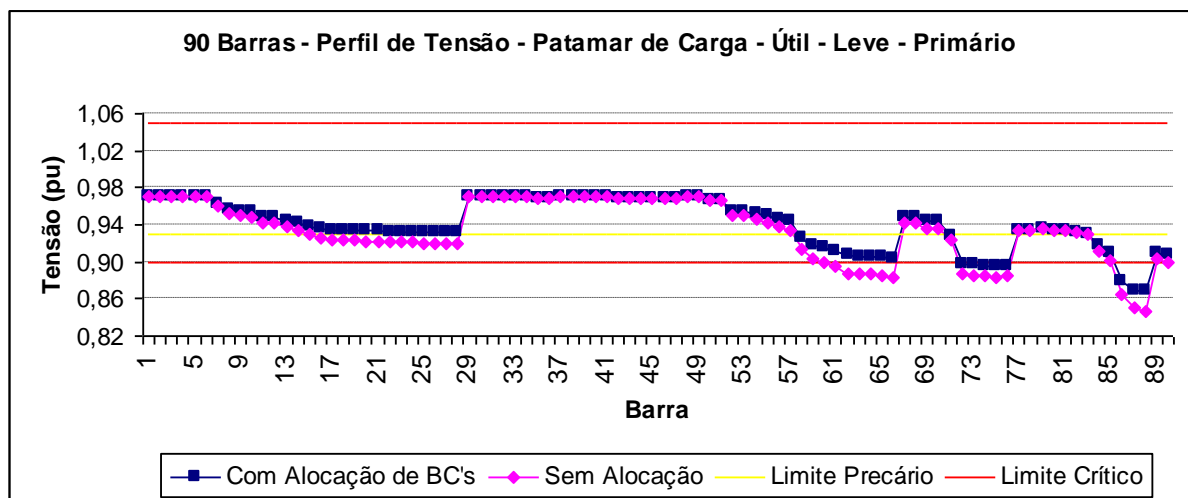


FIGURA C.30 – PERFIL DE TENSÃO – PRIMÁRIO – LEVE – ÚTIL

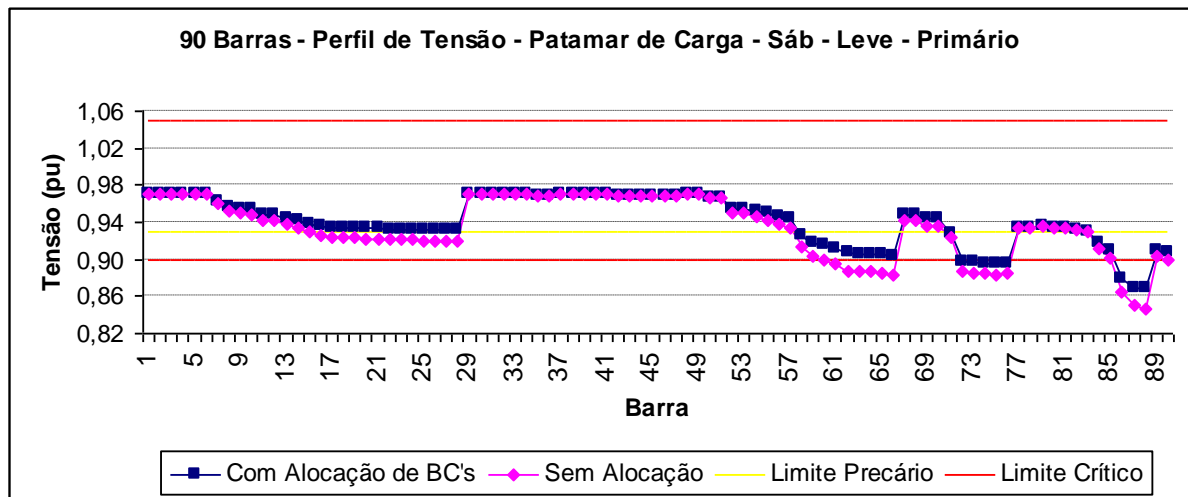


FIGURA C.31 – PERFIL DE TENSÃO – PRIMÁRIO – LEVE – SÁBADO

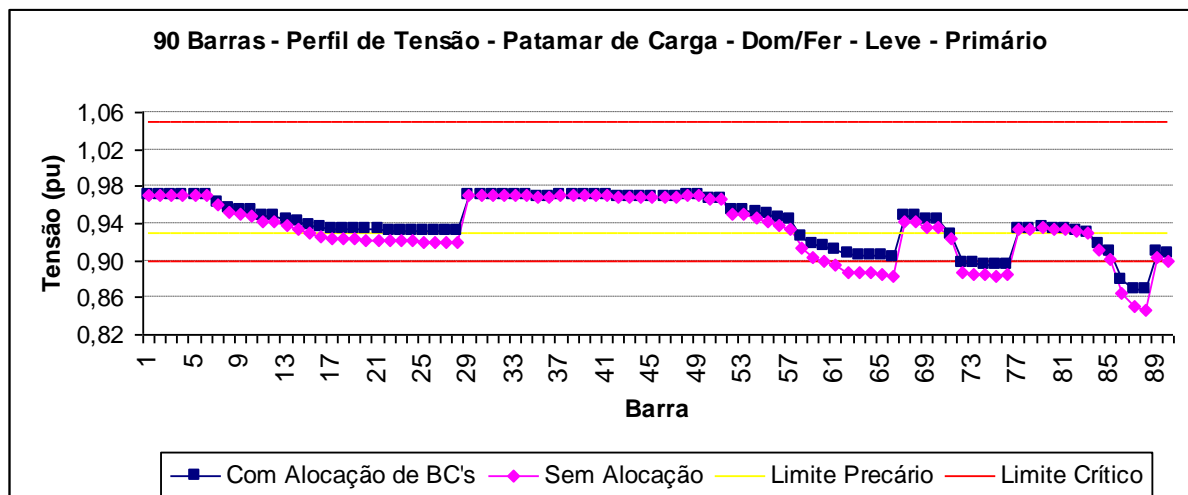


FIGURA C.32 – PERFIL DE TENSÃO – PRIMÁRIO – LEVE – DOM/FER

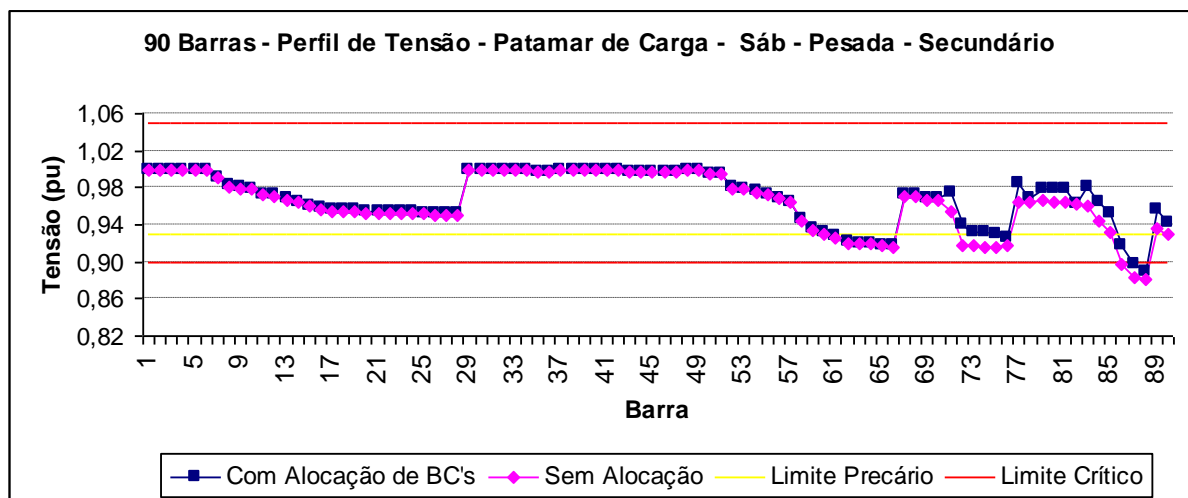


FIGURA C.33 – PERFIL DE TENSÃO – SECUNDÁRIO – PESADA – SÁBADO

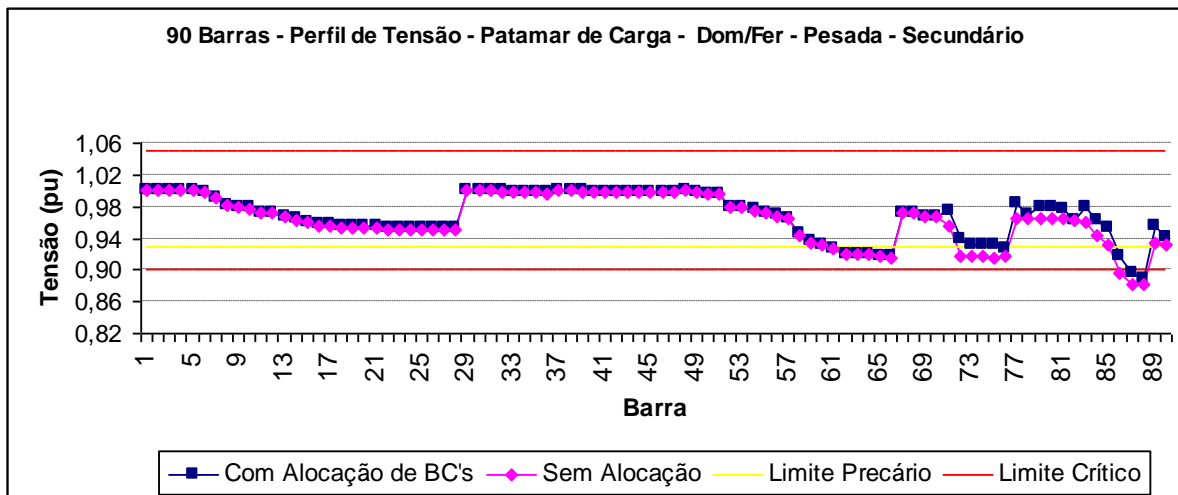


FIGURA C.34 – PERFIL DE TENSÃO – SECUNDÁRIO – PESADA– DOM/FER

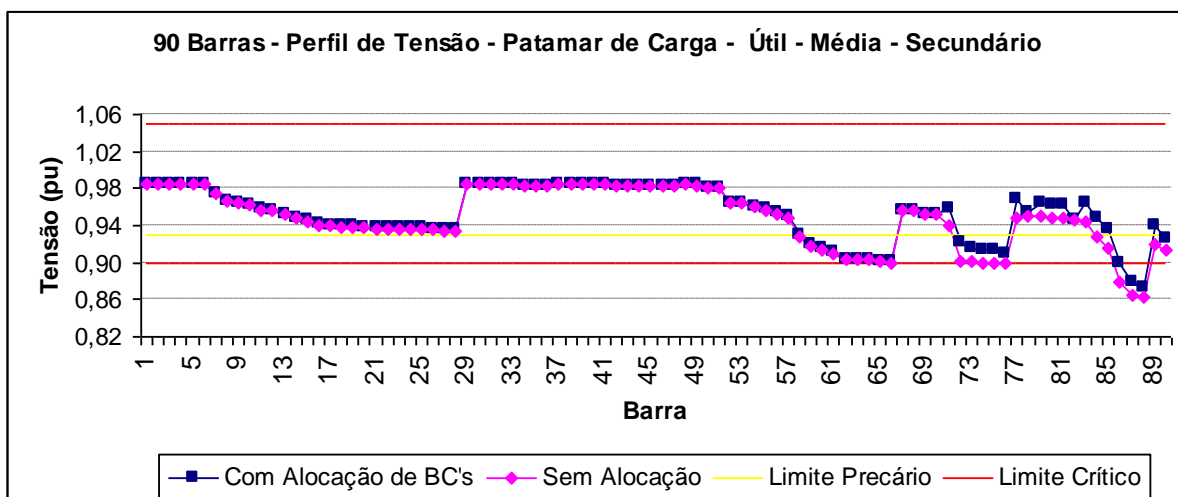


FIGURA C.35 – PERFIL DE TENSÃO – SECUNDÁRIO – MÉDIA– ÚTIL

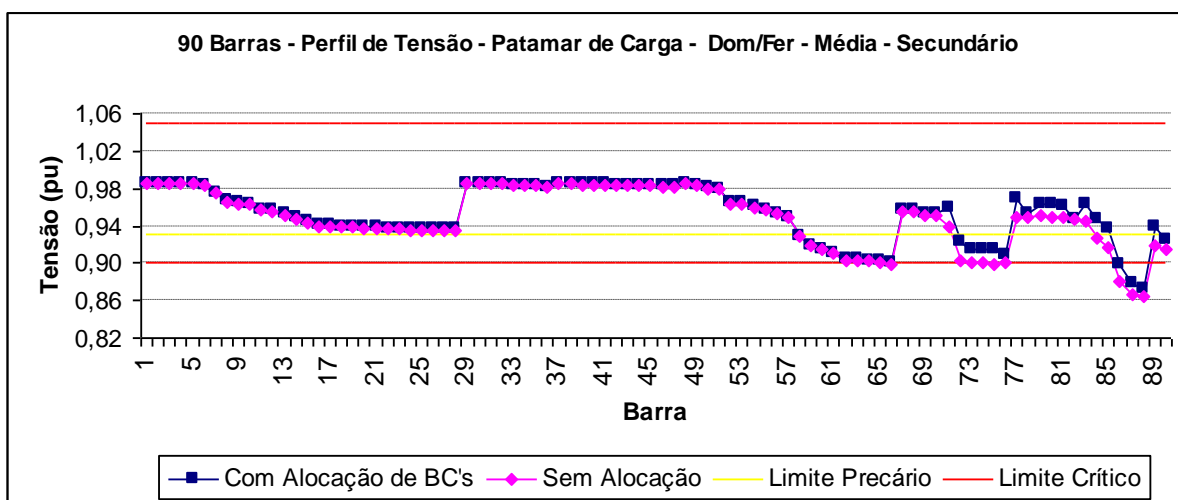


FIGURA C.36 – PERFIL DE TENSÃO – SECUNDÁRIO – MÉDIA– DOM/FER

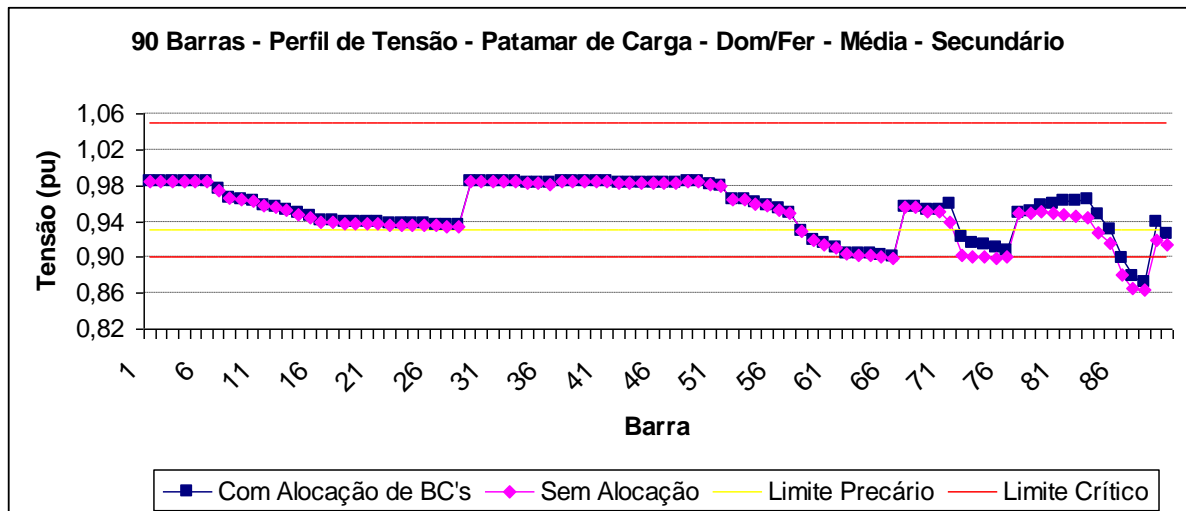


FIGURA C.37 – PERFIL DE TENSÃO – SECUNDÁRIO – MÉDIA– DOM/FER

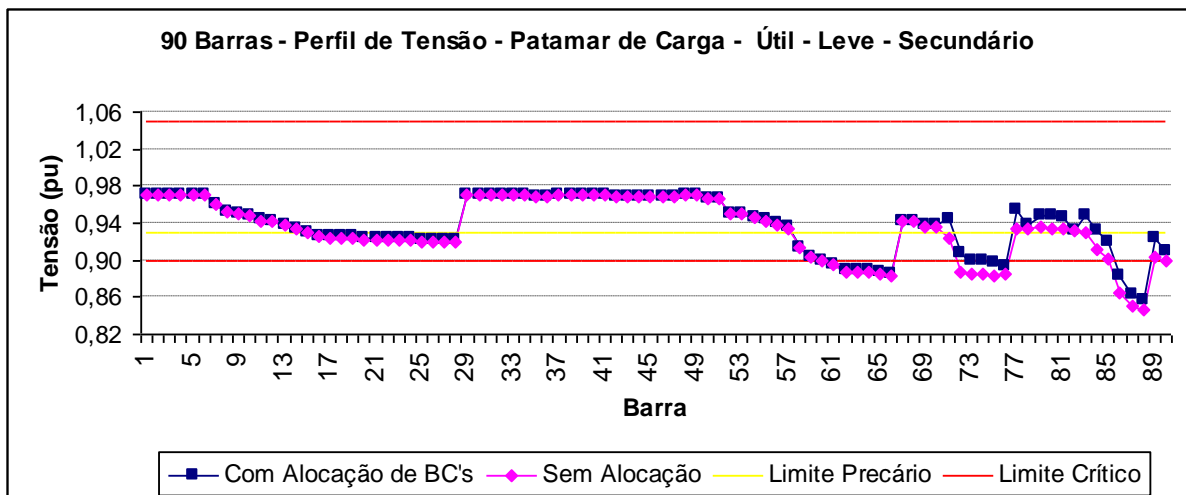


FIGURA C.38 – PERFIL DE TENSÃO – SECUNDÁRIO – LEVE– ÚTIL

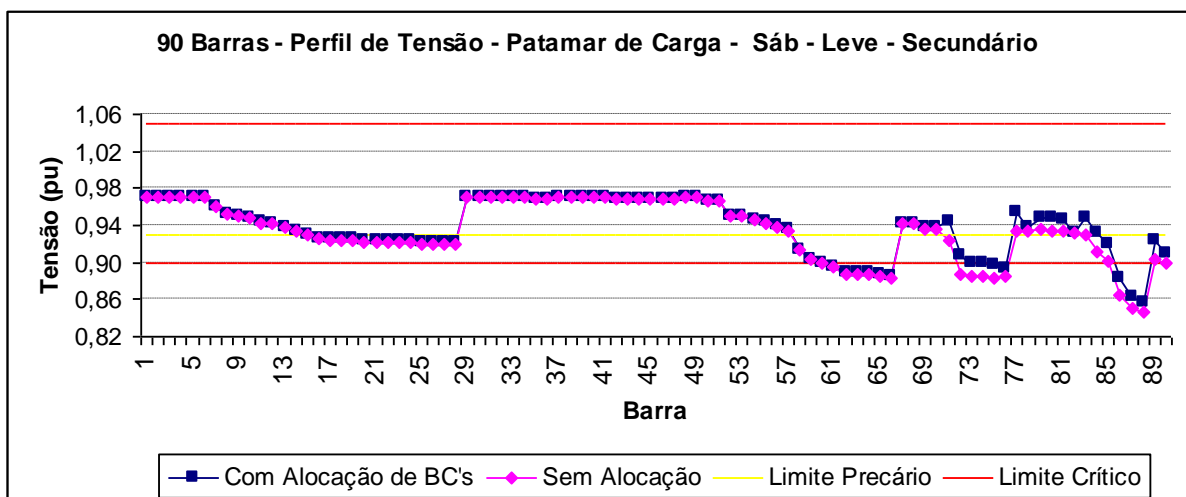


FIGURA C.39 – PERFIL DE TENSÃO – SECUNDÁRIO – LEVE– SÁBADO

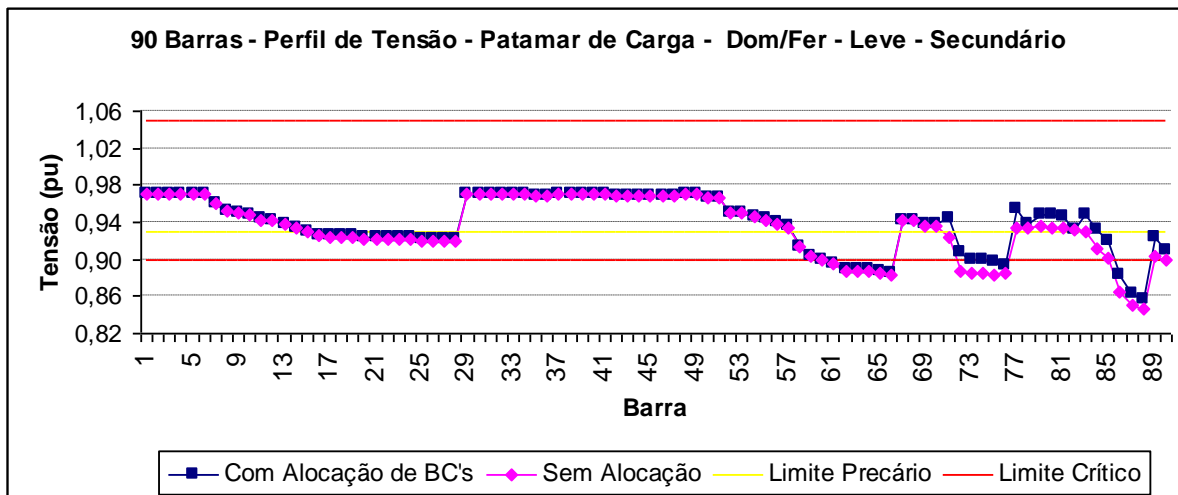


FIGURA C.40 – PERFIL DE TENSÃO – SECUNDÁRIO – LEVE– DOM/FER

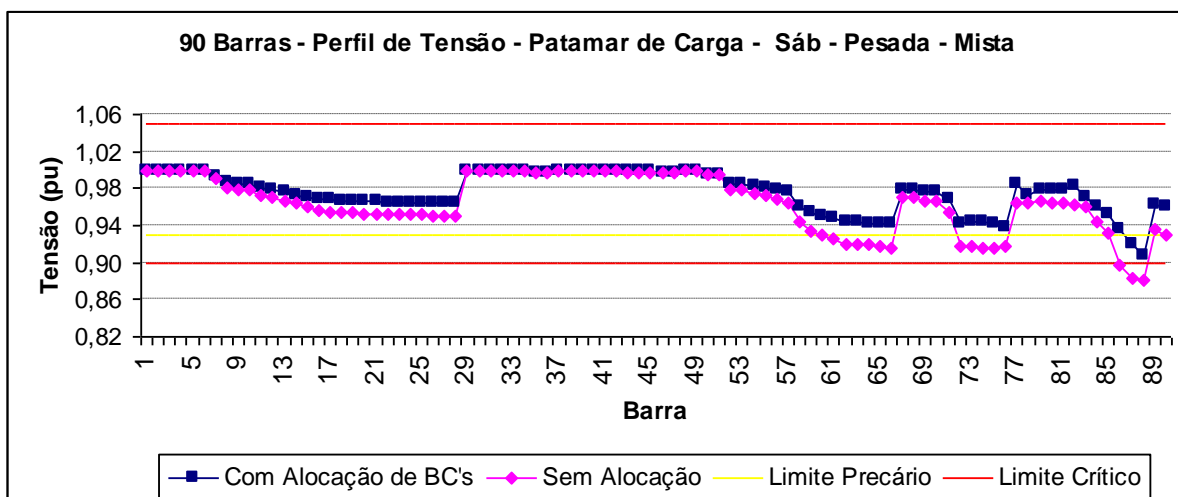


FIGURA C.41 – PERFIL DE TENSÃO – MISTA – PESADA– SÁBADO

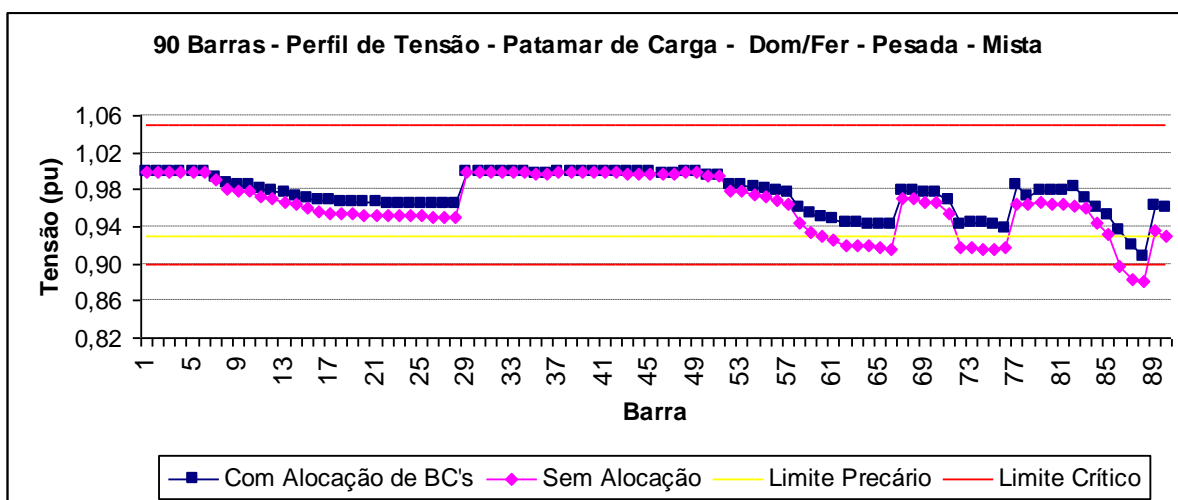


FIGURA C.42 – PERFIL DE TENSÃO – MISTA – PESADA– DOM/FER

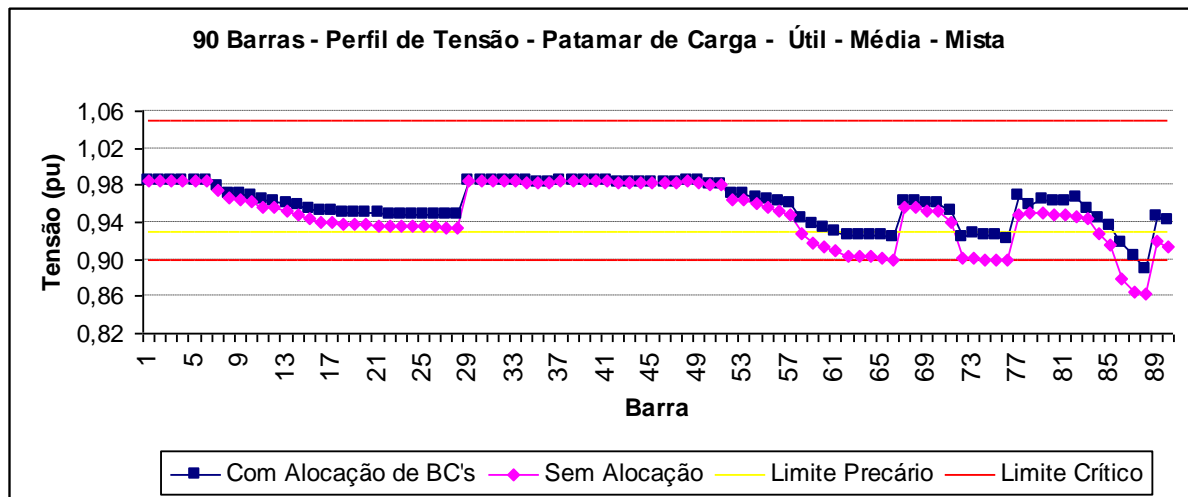


FIGURA C.43 – PERFIL DE TENSÃO – MISTA – MÉDIA– ÚTIL

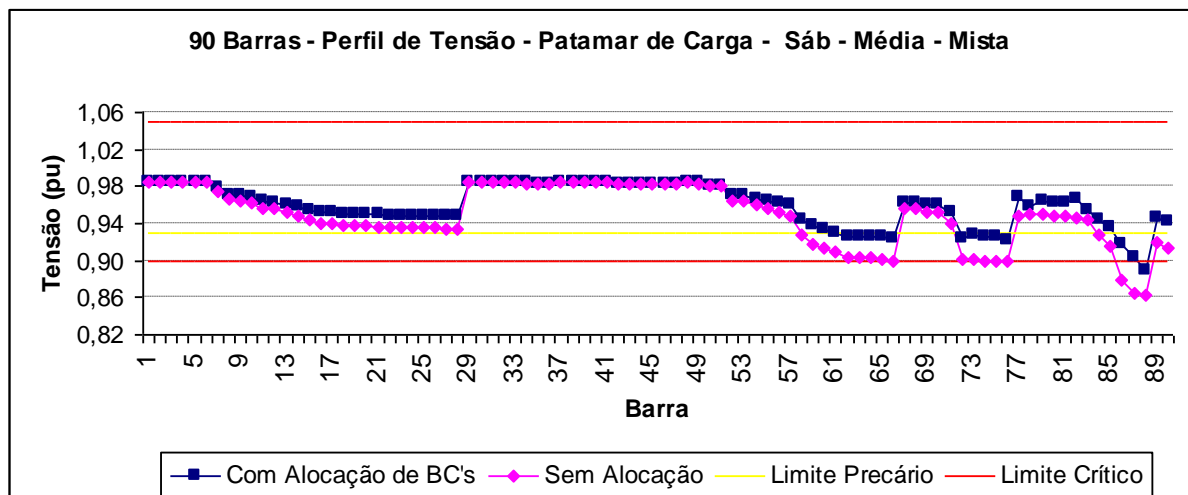


FIGURA C.44 – PERFIL DE TENSÃO – MISTA – MÉDIA– SÁBADO

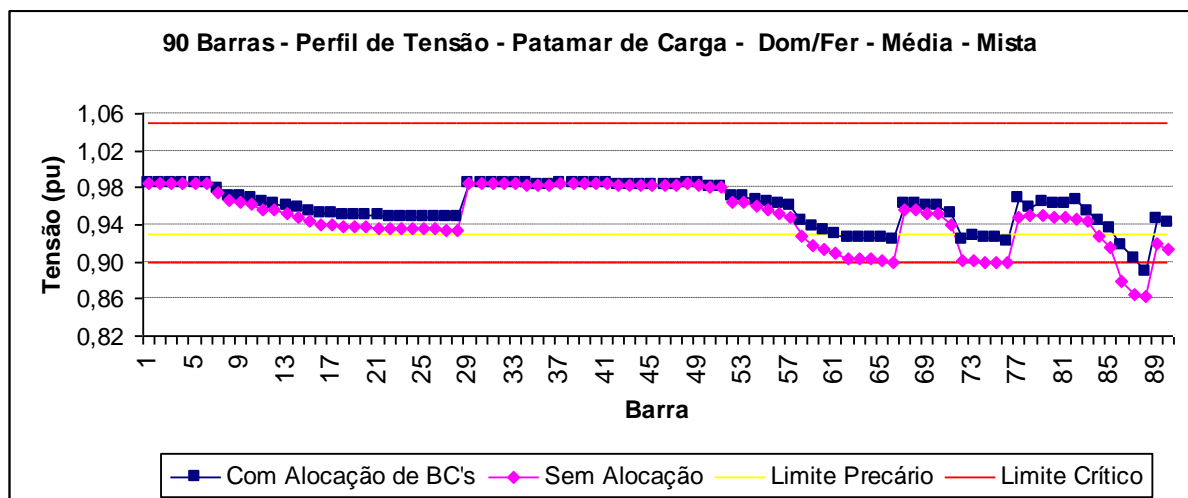


FIGURA C.45 – PERFIL DE TENSÃO – MISTA – MÉDIA– DOM/FER

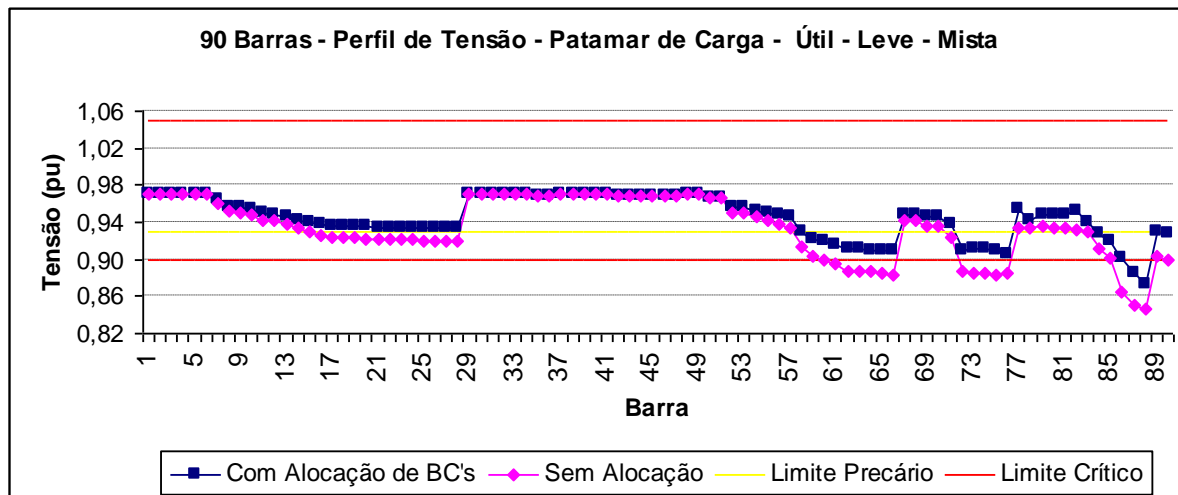


FIGURA C.46 – PERFIL DE TENSÃO – MISTA – LEVE– ÚTIL

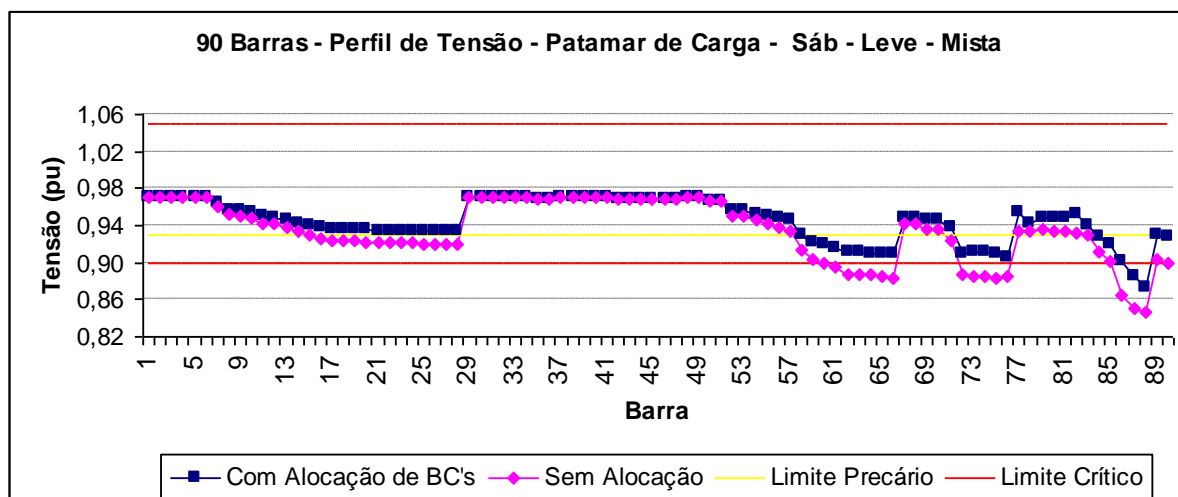


FIGURA C.47 – PERFIL DE TENSÃO – MISTA – LEVE– SÁBADO

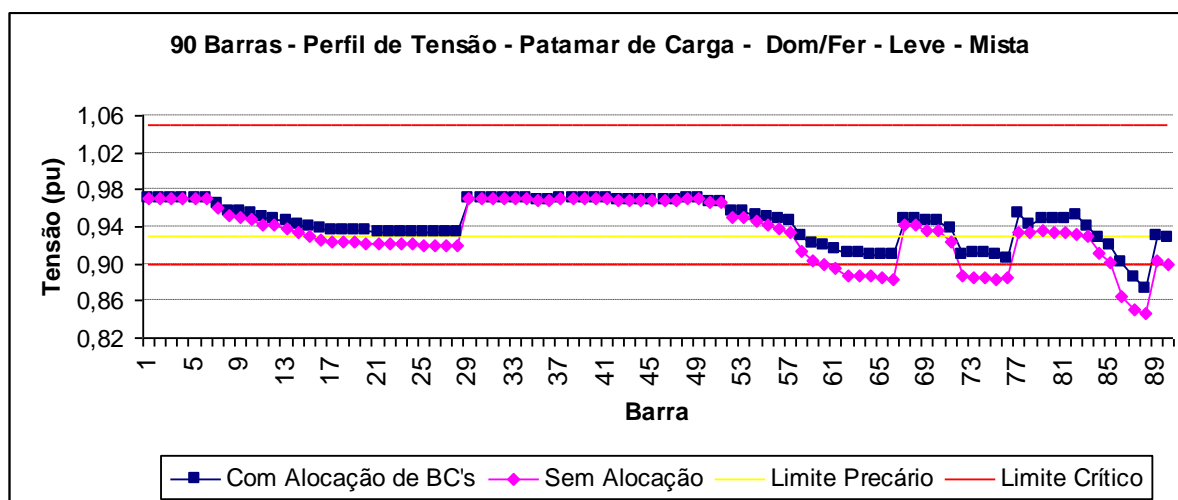


FIGURA C.48 – PERFIL DE TENSÃO – MISTA – LEVE– DOM/FER